

Proyecto Fin de Máster

Máster en Ingeniería Electrónica, Robótica y Automática

Automatización de una microrred con el modelo de programación de PLCopen y gestión energética con Control Heurístico

Autor: Rubén Galera Sobrino

Tutor: Carlos Bordons Alba

Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Proyecto Fin de Máster
Máster en Ingeniería Electrónica, Robótica y Automática

Automatización de una microrred con el modelo de programación de PLCopen y gestión energética con Control Heurístico

Autor:

Rubén Galera Sobrino

Tutor:

Carlos Bordons Alba

Catedrático

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Proyecto Fin de Máster: Automatización de una microrred con el modelo de programación de PLCopen y gestión energética con Control Heurístico

Autor: Rubén Galera Sobrino

Tutor: Carlos Bordons Alba

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

Seville, 2019

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría dedicar un efusivo agradecimiento a mi tutor, Carlos Bordons, y también a Miguel Ángel Ridaó, por la oportunidad que me han brindado de poder trabajar con ellos en sus proyectos de investigación con la microrred del laboratorio de hidrógeno de la Universidad de Sevilla. Les agradezco todo lo que me han enseñado a lo largo de esta singladura laboral, así como sus correcciones y sus consejos para la realización del presente trabajo fin de máster.

Quiero agradecer también al personal del Departamento de Termotecnia por el esfuerzo y la ayuda constante que nos han prestado a lo largo de estos meses. En especial, quiero dedicar un afectuoso agradecimiento a Javier Pino, por su labor de guía, su apoyo incondicional y su optimismo, que han sido determinantes para el éxito tanto de la puesta en marcha de la nueva microrred como de los posteriores ensayos que se han realizado con ella.

Por último, agradecimientos también para mis compañeros del *Fuel Cell Control Lab* por su compañerismo y colaboración.

Rubén Galera Sobrino

Sevilla, 2019

Resumen

El presente Trabajo Fin de Máster versa sobre los planteamientos, desarrollos y trabajos que se han realizado para la automatización de la Microrred experimental del laboratorio de hidrógeno de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla, incluyéndola integración de nuevos equipos, efectuados dentro del marco del proyecto "*Control Predictivo de Microrredes Reconfigurables con Almacenamiento Híbrido y Móvil*", de referencia DPI2016-78338-R, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España, y cuyos responsables son los catedráticos Carlos Bordons Alba y Miguel Ángel Ridao Carlini.

La Microrred experimental del laboratorio de hidrógeno o HyLab (*Hydrogen Laboratory*) es una instalación desarrollada por los Departamentos de Termotecnia y de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Sevilla, para investigar la integración de sistemas de almacenamiento de energía basados en el vector hidrógeno con fuentes de energía y sistemas de almacenamiento convencionales.

Esta Microrred dispone de un sistema de control con una arquitectura dividida en dos niveles. El primer nivel, integrado por un PLC, se encarga del control directo de la planta, monitorizando y comandando todos los equipos y sistemas que la integran, así como gestionando sus diferentes modos de operación, incluyendo la puesta en emergencia. En el segundo nivel, se ejecutan algoritmos y estrategias de control para la gestión energética de la Microrred.

En primer lugar, se ha realizado la integración de nuevos equipos y sistemas de generación y almacenamiento en la Microrred, para su monitorización y comando remotos desde la arquitectura de control que se describe.

A continuación, se ha desarrollado una nueva programación para el PLC que integra el primer nivel de control de la planta. Esta programación implementa un conjunto de modos de operación que ha sido definido en base a la metodología establecida por la Guía GEMMA (*Guide d'Etude des Modes de Marches et d'Arrêts*). Para su desarrollo, se ha empleado el modelo de programación estructurada para automatismos propuesto por PLCopen (www.plcopen.org).

Por último, con el objetivo de testear la conectividad entre el segundo nivel de control y el PLC con su nueva programación y los nuevos equipos ya integrados, se ha diseñado un control heurístico basado en reglas para la gestión energética de la Microrred y se ha ensayado de manera experimental.

Abstract

The present Master's Thesis deals about the approaches, developments and works carried out for the automation of the experimental Microgrid of the hydrogen laboratory of the Higher Technical School of Engineering of Seville, including the integration of new equipment, made within the framework of the project "Model predictive control of reconfigurable microgrids with hybrid and mobile energy storage" (DPI2016-78338-R), funded by the Ministry of Economy and Competitiveness of Spain, and whose heads are the professors Carlos Bordons Alba and Miguel Ángel Ridao Carlini.

The experimental Microgrid of the hydrogen laboratory or HyLab (Hydrogen Laboratory) is a facility developed by the Departments of Thermotechnics and Systems and Automation Engineering of the Seville University, for researching the integration of energy storage systems based on the hydrogen vector with conventional energy sources and storage systems.

This Microgrid has a control system with an architecture divided into two levels. The first level, integrated by a PLC, performs the direct control of the entire facility, by monitoring and command of all the equipment and systems that integrate it, as well as by management of its different operation modes, including the emergency stopping. In the second level, it is executed algorithms and control strategies for energy management of the Microgrid.

In first place, it has been carried out the integration of new generation and storage equipment and systems in the Microgrid, for its remote monitoring and command from the control architecture described.

Next, a new program for the PLC that integrates the first control level of the plant has been developed. This program implements a set of operation modes that have been defined based on the methodology established by the GEMMA guide (*Guide d'Etude des Modes de Marches et d'Arrêts*). For its development, it has been used the PLCopen structured model for PLC programming (www.plcopen.org).

Finally, in order to test the connectivity between the second level of control and the PLC with its new program and the new equipment already integrated, it has been designed and implemented a heuristic control based on rules for the energy management of the Microgrid, and it has been tested experimentally.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xxii
Acrónimos	xxxii
1 Introducción. Objetivos y alcance del proyecto	1
2 Descripción de la Microrred experimental del HyLab	5
2.1 <i>Antecedentes</i>	5
2.2 <i>Proyectos realizados con la Microrred experimental del laboratorio HyLab</i>	7
2.3 <i>Publicaciones, trabajos académicos y tesis doctorales</i>	10
2.4 <i>Descripción general de la Microrred</i>	13
2.5 <i>Equipos y sistemas de la Microrred</i>	15
2.10.1 <i>Campo de paneles fotovoltaicos</i>	15
2.10.2 <i>Convertidor DC/DC Studer Variostring VS-70 para campo de paneles fotovoltaicos</i>	18
2.10.3 <i>Stack de baterías de plomo-ácido Classic Solar Enersol T 370 de Exide</i>	22
2.10.4 <i>Stack de baterías de litio GBS LFP 100Ah con BMS Elite Power</i>	23
2.10.5 <i>Convertidor DC/DC GEP-AICIA ESS3 para Stack de Baterías de Litio</i>	25
2.10.6 <i>Electrolizador Acta Heliocentris EL500</i>	26
2.10.7 <i>Pila de Hidrógeno Acta Heliocentris NEXA 1200</i>	28
2.10.8 <i>Convertidor DC/DC Win Inertia 3kW para Pila de Hidrógeno</i>	31
2.10.9 <i>Fuente de alimentación programable DC Powerbox LBS 60-100</i>	32
2.10.10 <i>Carga electrónica programable DC Amrel PLA 2.5K-60-1000</i>	35
2.10.11 <i>Tanques de hidruros metálicos HBond 7000H para almacenamiento de hidrógeno</i>	38
2.10.12 <i>Circuito hidráulico para la inyección de agua fría o caliente en los tanques de hidruros</i>	39
2.10.13 <i>Circuito de hidrógeno</i>	40
2.11 <i>Descripción de la arquitectura de control</i>	41
2.12 <i>Descripción de la arquitectura de comunicaciones</i>	45
3 Integración de nuevos equipos en la Microrred del HyLab	47
3.1 <i>Introducción</i>	47
3.2 <i>Integración del electrolizador Acta Heliocentris EL500</i>	48
3.4.1 <i>Generalidades</i>	48
3.4.2 <i>Implementación de la comunicación entre el electrolizador y el FLC. Desarrollo de un programa de pruebas para monitorización y comando del electrolizador desde el FLC.</i>	48
3.4.3 <i>Implementación del control por histéresis para la presión en el buffer de salida del electrolizador.</i>	52
3.4.4 <i>Características estáticas y dinámicas del electrolizador EL500</i>	55
3.5 <i>Integración de la pila de hidrógeno Acta Heliocentris Nexa 1200</i>	59

3.6	<i>Integración del stack de baterías de litio</i>	61
3.7	<i>Integración del convertidor fotovoltaico Studer VarioString VS-70</i>	63
4	Programación del <i>First Level Controller</i>	65
4.1	<i>Introducción. Especificación de las funcionalidades requeridas para el FLC.</i>	65
4.2	<i>Definición de los modos de operación de la Microrred</i>	67
4.3	<i>Especificación de las condiciones de error de la Microrred</i>	71
4.4	<i>Desarrollo del programa del FLC en Unity Pro. Estructura y organización. Modelo PLCopen.</i>	73
4.5	<i>Bloques de pretratamiento y comando para la programación del First Level Controller</i>	79
4.5.1	Bloques de pretratamiento y comando para el convertidor DC/DC asociado al campo de paneles fotovoltaicos (CPH)	79
4.5.2	Bloque de pretratamiento para el módulo EMS del stack de baterías de litio (LI)	82
4.5.3	Bloques de pretratamiento y comando para el electrolizador (EZ) y el convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (CLI)	84
4.5.4	Bloques de pretratamiento y comando para la pila de hidrógeno (FC)	92
4.5.5	Bloques de pretratamiento y comando para el convertidor DC/DC asociado a la pila de hidrógeno (CFC)	96
4.5.6	Bloques de pretratamiento y comando para la fuente de alimentación programable (PS)	101
4.5.7	Bloques de pretratamiento y comando para la carga electrónica programable (DCL)	104
4.5.8	Bloques de pretratamiento y comando para los circuitos de hidrógeno y de agua	107
4.5.9	Bloque de pretratamiento para el stack de baterías de plomo (PB)	117
4.5.10	Bloque de pretratamiento para los tanques de hidruros metálicos	120
4.6	<i>Mapas de variables para la monitorización y comando general de la Microrred desde el First Level Controller</i>	121
4.7	<i>Bloques de programa para la implementación de los modos de operación del First Level Controller</i>	129
4.7.1	Bloque de programa para el estado de parada A1 Stop	129
4.7.2	Bloque de programa para la secuencia de puesta en marcha F2 Starting Process	130
4.7.3	Bloques de programa para los modos de funcionamiento manual F1.2 Manual Function y diagnóstico y tratamiento de errores D1.2 Diagnosis	133
4.7.4	Bloques de programa para el modo de funcionamiento remoto F1.1 Remote Function	137
4.7.5	Bloque de programa para la secuencia de parada F3 Stopping Process	141
4.7.6	Bloque de programa para la secuencia de parada de emergencia D1.0 Emergency Stop Sequence	143
4.7.7	Bloque para el estado de emergencia D1.1 Emergency State	145
5	Gestión energética de la Microrred desde el Segundo Nivel de Control	146
5.1	<i>Introducción. Justificación de la estrategia de control seleccionada.</i>	146
5.2	<i>Formulación del algoritmo de control heurístico basado en reglas.</i>	147
5.3	<i>Simulación del algoritmo de control heurístico basado en reglas.</i>	151
5.4	<i>Realización del ensayo experimental con el algoritmo de control heurístico basado en reglas.</i>	166
6	Conclusiones y futuras mejoras	169
7	Anexos	171
7.1	<i>ANEXO 1: Communication system</i>	171
7.1.1	Introduction. Communication system general scheme	171
7.1.2	Communication map of ESS3 DC/DC Converter to Lithium Battery Stack (CLI)	172
7.1.3	Communication map of Acta Heliocentris EL500 Electrolyzer (EZ)	175
7.1.4	Communication map of Win Inertia DC/DC Converter to H2 Fuel Cell (CFC)	178
7.1.5	Communication map of NEXA 1200 H2 Fuel Cell (FC)	180
7.1.6	Communication map of Lite Power BMS for Lithium Battery Stack (Li)	185
7.1.7	Communication map of Studer VarioString VS-70 DC/DC Converter to Photovoltaic Field (CPH)	188
7.1.8	Communication map of CAN/CANopen Gateway 1	190
7.1.9	CAN/CANopen gateway 2 communication map	191

7.1.10	Implementation of Modbus TCP/IP network	193
7.1.11	Implementation of CAN and CANopen networks	193
7.2	<i>ANEXO 2: Interfaz de usuario del FLC</i>	195
7.2.1	Introducción. Requisitos <i>hardware</i> y <i>software</i> . Objetivos y alcance del Anexo.	195
7.2.2	Arquitectura de la interfaz de usuario del FLC	196
7.2.3	Pantalla para Selección de Modos de Operación	198
7.2.4	Pantalla <i>General View</i>	203
7.2.5	Panel Gestión DC/DC Fotovoltaico	207
7.2.6	Panel Gestión Lead Battery Stack	211
7.2.7	Panel Gestión Lithium Battery Stack	214
7.2.8	Panel Gestión DC/DC Baterías de Litio	217
7.2.9	Panel Gestión Electrolizador	222
7.2.10	Panel Gestión H2 Fuel Cell	229
7.2.11	Panel Gestión DC/DC H2 Fuel Cell	234
7.2.12	Panel Gestión Fuente de Alimentación Programable	238
7.2.13	Panel Gestión Carga Programable	240
7.2.14	Panel Gestión Circuitos de H2 y de Agua	242
7.3	<i>ANEXO 3: Parámetros de ajuste del First Level Controller</i>	244
7.3.1	Parámetros de ajuste para el stack de baterías de plomo (PB)	244
7.3.2	Parámetros de ajuste para el stack de baterías de litio (LI)	245
7.3.3	Parámetros de ajuste para el convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (CLI)	246
7.3.4	Parámetros de ajuste para el electrolizador (EZ)	247
7.3.5	Parámetros de ajuste para la pila de hidrógeno (FC)	248
7.3.6	Parámetros de ajuste para la fuente de alimentación programable (PS)	249
7.3.7	Parámetros de ajuste para la carga DC programable (DCL)	249
7.3.8	Parámetros de ajuste para los circuitos de hidrógeno y agua	250
7.4	<i>ANEXO 4: Ensayos realizados para la caracterización del electrolizador EL500</i>	252
7.4.1	Resultados del ensayo realizado el 19 de Julio de 2018 a las 10:22 horas.	252
7.4.2	Resultados del ensayo realizado el 19 de Julio de 2018 a las 11:30 horas.	252
7.4.3	Resultados del ensayo realizado el 19 de Julio de 2018 a las 12:05 horas.	252
7.4.4	Resultados del ensayo realizado el 20 de Julio de 2018 a las 11:27 horas.	253
7.4.5	Resultados del ensayo realizado el 23 de Julio de 2018 a las 12:11 horas.	253
7.4.6	Resultados del ensayo realizado el 12 de Noviembre de 2018 a las 12:30 horas.	253
7.4.7	Resultados del ensayo realizado el 13 de Noviembre de 2018 a las 12:13 horas.	254
7.4.8	Resultados del ensayo realizado el 19 de Noviembre de 2018 a las 14:09 horas.	254
7.4.9	Obtención de la curva <i>Caudal de H₂ - Potencia de Stacks</i> .	255
7.4.10	Obtención de la curva <i>Consigna Porcentual de Caudal - Potencia de Stacks</i> .	257
7.5	<i>ANEXO V: Código del algoritmo de control heurístico basado en reglas</i>	259
	Referencias	269

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características del módulo A-250M de Atersa - Grupo Elecnor.	17
Tabla 2. Características técnicas cargador solar VarioString VS-70 de Studer Innotec.	21
Tabla 3. Características de la celda de plomo-ácido Classic Solar Enersol T-370 de Exide Technologies	22
Tabla 4. Características del stack de baterías de plomo-ácido	22
Tabla 5. Características técnicas de la celda GBS LFS 100 Ah.	24
Tabla 6. Características técnicas del electrolizador Acta Heliocentris EL500.	27
Tabla 7. Características técnicas del stack FCgen-1020ACS de Ballard Power Systems.	30
Tabla 8. Características técnicas del equipo Heliocentris Nexa 1200.	30
Tabla 9. Características técnicas de la fuente de alimentación programable DC Powerbox LBS 60-100. Parte 1.	33
Tabla 10. Características técnicas de la fuente de alimentación programable DC Powerbox LBS 60-100. Parte 1.	34
Tabla 11. Características técnicas de la carga electrónica programable AMETEK PLA 2.5K-60-1000.	37
Tabla 12. Características del tanque de hidruros metálicos HBond-7000H de Labtech	38
Tabla 13. Características de la plataforma de automatización M340 de Schneider.	42
Tabla 14. Variables de entrada del bloque de pretratamiento CPH_MC.	80
Tabla 15. Variables de salida del bloque de pretratamiento CPH_MC.	81
Tabla 16. Variables de entrada y salida del bloque de pretratamiento CPH_MC.	81
Tabla 17. Variables de entrada del bloque de control y comando CPH_CC.	81
Tabla 18. Variables de salida del bloque de control y comando CPH_CC.	81
Tabla 19. Variables de entrada del bloque de pretratamiento LI_MC.	83
Tabla 20. Variables de salida del bloque de pretratamiento LI_MC.	83
Tabla 21. Variables de entrada del bloque de pretratamiento EZ_CLI_MC.	87
Tabla 22. Variables de salida del bloque de pretratamiento EZ_CLI_MC (Parte 1).	88
Tabla 23. Variables de salida del bloque de pretratamiento EZ_CLI_MC (Parte 2).	89
Tabla 24. Variables de entrada del bloque de control y comando EZ_CLI_CC (Parte 1).	90
Tabla 25. Variables de entrada del bloque de control y comando EZ_CLI_CC (Parte 2).	91
Tabla 26. Variables de salida del bloque de control y comando EZ_CLI_CC.	91
Tabla 27. Variables de entrada del bloque de pretratamiento FC_MC.	94
Tabla 28. Variables de salida del bloque de pretratamiento FC_MC.	95
Tabla 29. Variables de entrada del bloque de control y comando FC_CC.	95
Tabla 30. Variables de salida del bloque de control y comando FC_CC.	95
Tabla 31. Variables de entrada del bloque de pretratamiento CFC_MC.	98
Tabla 32. Variables de salida del bloque de pretratamiento CFC_MC.	99

Tabla 33. Variables de entrada del bloque de control y comando CFC_CC.	100
Tabla 34. Variables de salida del bloque de control y comando CFC_CC.	100
Tabla 35. Variables de entrada del bloque de pretratamiento PS_MC.	102
Tabla 36. Variables de salida del bloque de pretratamiento PS_MC.	102
Tabla 37. Variables de entrada del bloque de control y comando PS_CC.	103
Tabla 38. Variables de salida del bloque de control y comando PS_CC.	103
Tabla 39. Variables de entrada del bloque de pretratamiento DCL_MC.	105
Tabla 40. Variables de salida del bloque de pretratamiento DCL_MC.	105
Tabla 41. Variables de entrada del bloque de control y comando DCL_CC.	106
Tabla 42. Variables de salida del bloque de control y comando DCL_CC.	106
Tabla 43. Variables de entrada del bloque de pretratamiento H2C_MC.	113
Tabla 44. Variables de salida del bloque de pretratamiento H2C_MC.	113
Tabla 45. Variables de entrada del bloque de pretratamiento WC_MC.	113
Tabla 46. Variables de salida del bloque de pretratamiento WC_MC.	114
Tabla 47. Variables de entrada del bloque de control y comando H2C_WC_CC.	115
Tabla 48. Variables de salida del bloque de control y comando H2C_WC_CC.	116
Tabla 49. Variables de entrada del bloque de pretratamiento PB_MC.	118
Tabla 50. Variables de salida del bloque de pretratamiento PB_MC.	119
Tabla 51. Variables de entrada del bloque de pretratamiento NHM_MC.	120
Tabla 52. Variables de salida del bloque de pretratamiento NHM_MC.	120
Tabla 53. Mapa de Monitorización de la Microrred desde el FLC (parte 1).	122
Tabla 54. Mapa de Monitorización de la Microrred desde el FLC (parte 2).	123
Tabla 55. Mapa de Monitorización de la Microrred desde el FLC (parte 3).	124
Tabla 56. Mapa de Monitorización de la Microrred desde el FLC (parte 4).	125
Tabla 57. Mapa de Monitorización de la Microrred desde el FLC (parte 5).	126
Tabla 58. Mapa de Monitorización de la Microrred desde el FLC (parte 6).	127
Tabla 59. Mapa de Comando General de la Microrred desde el FLC.	128
Tabla 60. Mapa de Comando del Modo de Funcionamiento Manual de la Microrred.	136
Tabla 61. Mapa de Comando del Modo de Funcionamiento Remoto.	140
Tabla 62. Setting features of Modbus TCP/IP for ESS3 DC/DC Converter to Lithium Battery Stack (CLI).	172
Tabla 63. Modbus registers of ESS3 DC/DC Converter to Lithium Battery Stack (CLI).	172
Tabla 64. System status flags register.	173
Tabla 65. Protection flags register.	173
Tabla 66. System error flags register.	174
Tabla 67. Command flags register.	174
Tabla 68. Setting features of Modbus TCP/IP for EL500 electrolyzer (EZ).	175
Tabla 69. Modbus registers of EL500 electrolyzer (EZ).	175
Tabla 70. EL500 electrolyzer state register code.	176

Tabla 71. EL500 electrolyzer error flags register.	176
Tabla 72. EL500 electrolyzer alarm flags register.	177
Tabla 73. EL500 electrolyzer dryer state register code.	177
Tabla 74. EL500 electrolyzer dryer error flags register.	177
Tabla 75. Setting features of CAN for Win Inertia DC/DC Converter to H2 Fuel Cell (CFC).	178
Tabla 76. CAN frames of Win Inertia DC/DC Converter to H2 Fuel Cell (CFC).	178
Tabla 77. Win Inertia DC/DC state register code.	179
Tabla 78. Win Inertia DC/DC error flags register 1.	179
Tabla 79. Win Inertia DC/DC error flags register 2.	179
Tabla 80. Win Inertia DC/DC command flags register.	179
Tabla 81. Setting features of CAN for Acta Heliocentris NEXA 1200 H2 fuel cell (FC).	180
Tabla 82. CAN frames of Acta Heliocentris NEXA 1200 H2 Fuel Cell (FC).	181
Tabla 83. NEXA 1200 FC warning flags register 1.	182
Tabla 84. NEXA 1200 FC warning flags register 2.	182
Tabla 85. NEXA 1200 FC system state register code.	182
Tabla 86. NEXA 1200 FC information flags register.	183
Tabla 87. NEXA 1200 FC error flags register 1.	183
Tabla 88. NEXA 1200 FC error flags register 2.	183
Tabla 89. NEXA 1200 FC error flags register 3.	184
Tabla 90. NEXA 1200 FC error flags register 4.	184
Tabla 91. NEXA 1200 FC command flags register.	184
Tabla 92. Setting features of CAN for Lite Power BMS of lithium battery stack (Li).	185
Tabla 93. CAN frames of Lite Power BMS of lithium battery stack (Li).	185
Tabla 94. Broadcaster v3.1 frame structure.	185
Tabla 95. BMS lithium battery stack Broadcaster v3.1 frames (part 1).	186
Tabla 96. BMS lithium battery stack Broadcaster v3.1 frames (part 2).	187
Tabla 97. Setting features of CAN for Studer Variosting VS-70 DC/DC converter to photovoltaic field (CPH).	188
Tabla 98. Xtender Serial CAN frame for reading request to single VS-70 DC/DC.	188
Tabla 99. Xtender Serial CAN frame for reading response to single VS-70 DC/DC.	188
Tabla 100. Xtender Serial CAN frame for writing of On/Off command to single VS-70 DC/DC.	188
Tabla 101. VS-70 DC/DC converter measurement registers.	189
Tabla 102. VS-70 DC/DC converter command registers.	189
Tabla 103. Setting features of CAN/CANopen Gateway 1.	190
Tabla 104. CANopen object dictionary of CAN/CANopen Gateway 1.	190
Tabla 105. Setting features of CAN/CANopen Gateway 2.	191
Tabla 106. CANopen object dictionary of CAN/CANopen Gateway 2 (part 1).	191
Tabla 107. CANopen object dictionary of CAN/CANopen Gateway 2 (part 2).	192
Tabla 108. Límites de <i>warning</i> máximos y mínimos de tensión y estado de carga del stack de baterías de	

plomo (PB).	212
Tabla 109. Límites de error máximos y mínimos de tensión y estado de carga del stack de baterías de plomo (PB).	212
Tabla 110. Límites de aviso para el stack de baterías de litio.	215
Tabla 111. Resultados del ensayo realizado el 19 de Julio de 2018 a las 10:22 horas.	252
Tabla 112. Resultados del ensayo realizado el 19 de Julio de 2018 a las 11:30 horas.	252
Tabla 113. Resultados del ensayo realizado el 19 de Julio de 2018 a las 12:05 horas.	252
Tabla 114. Resultados del ensayo realizado el 20 de Julio de 2018 a las 12:31 horas.	253
Tabla 115. Resultados del ensayo realizado el 23 de Julio de 2018 a las 12:11 horas.	253
Tabla 116. Resultados del ensayo realizado el 12 de Noviembre de 2018 a las 12:30 horas.	253
Tabla 117. Resultados del ensayo realizado el 13 de Noviembre de 2018 a las 12:13 horas.	254
Tabla 118. Resultados del ensayo realizado el 19 de Noviembre de 2018 a las 14:09 horas.	254
Tabla 119. Puntos de <i>Caudal H2 - Potencia Stacks</i> obtenidos de los ensayos.	255
Tabla 120. Puntos de <i>Consigna Porcentual - Potencia Stacks</i> obtenidos de los ensayos.	257

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de los sistemas de generación y transporte convencionales. Extraído de [44].	2
Figura 2. Estructura de los sistemas de generación y transporte distribuidos. Extraído de [44].	2
Figura 3. Ejemplo de microrred. Extraído de [45].	3
Figura 4. Microrred experimental del laboratorio HyLab original. Imagen extraída de [1].	6
Figura 5. Microrred experimental del laboratorio HyLab en la actualidad.	6
Figura 6. Esquema de conexionado eléctrico de la Microrred experimental del laboratorio HyLab.	14
Figura 7. Módulo fotovoltaico A-250M de Atersa - Grupo Elecnor. Imagen extraída de [38].	15
Figura 8. Curva I-V del módulo A-250M de Atersa - Grupo Elecnor, para una temperatura ambiente de 25 °C y una irradiancia de 1 kW/m ² .	16
Figura 9. Curvas I-V del módulo A-250M de Atersa - Grupo Elecnor, para diferentes niveles de irradiancia.	16
Figura 10. Derivas térmicas en la curva I-V del módulo A-250M de Atersa - Grupo Elecnor, para una irradiancia de 1 kW/m ² .	17
Figura 11. Cargador solar VarioString VS-70 de Studer Innotec.	18
Figura 12. Rangos de funcionamiento del cargador solar VarioString VS-70 de Studer Innotec.	19
Figura 13. Módulo accesorio RCC-02 de Studer Innotec.	19
Figura 14. Módulo Xcom-CAN de Studer Innotec.	20
Figura 15. Comunicación entre el cargador solar VarioString VS-70, el módulo remoto de control RCC-02 y el módulo de comunicación Xcom-CAN.	21
Figura 16. Stack de baterías de plomo-acido	22
Figura 17. Stack de baterías de litio GBS LFP 100Ah.	23
Figura 18. <i>Sense Board</i> .	23
Figura 19. Módulo EMS de Elite Power Solutions.	24
Figura 20. Convertidor ESS2-DCDC.	25
Figura 21. Electrolizador Acta Heliocentris EL500.	26
Figura 22. Stack AES500 de Acta-Heliocentris.	26
Figura 23. Equipo Heliocentris Nexa 1200.	28
Figura 24. Stack FCgen-1020ACS de Ballard Power Systems.	28
Figura 25. Curva característica del stack FCgen-1020ACS de Ballard Power Systems.	29
Figura 26. Convertidor DC/DC de 3 kW de Wind Inertia Technologies S.L.	31
Figura 27. Fuente de alimentación programable DC Powerbox LBS 60-100.	32
Figura 28. Carga electrónica programable DC Amrel AMETEK PLA 2.5K-60-1000.	35

Figura 29. Cableado de la interfaz analógica de la carga electrónica programable AMETEK PLA 2.5K-60-1000.	36
Figura 30. Tanque de hidruros metálicos HBond-7000H. Imagen extraída de [34].	38
Figura 31. Plataforma de automatización M340 de Schneider empleada para la implementación del <i>First Level Controller</i> .	42
Figura 32. Arquitectura de control de la Microrred del Hylab.	44
Figura 33. Arquitectura de comunicaciones.	45
Figura 34. Pasarela CAN/CANopen de ADFweb.	46
Figura 35. Implementación en Unity Pro del gestor para la comunicación Modbus.	49
Figura 36. Obtención del estado, los flags de errores y las medidas de magnitudes del electrolizador a partir de la información obtenida por Modbus. Ejemplo de solapamiento de posiciones de memoria y código de acondicionamiento.	50
Figura 37. Interfaz del programa de pruebas para el electrolizador.	51
Figura 38. Representación del circuito de hidrógeno del electrolizador.	53
Figura 39. Curvas de presión y de caudal de hidrógeno en el ensayo para la prueba del control por histéresis de la presión en los stacks.	54
Figura 40. Característica <i>Caudal de H₂ - Potencia de Stacks</i> .	55
Figura 41. Característica <i>Consigna Porcentual - Potencia de Stacks</i> .	56
Figura 42. Variación del caudal de producción de hidrógeno ante un cambio de <i>setpoint</i> .	57
Figura 43. Curvas de presión de los stacks y del buffer de salida, y curva de generación de H ₂ , durante el proceso de arranque del electrolizador.	58
Figura 44. Montaje de la pasarela ADFweb CAN/CANopen.	60
Figura 45. Definición de las PDOs de recepción y transmisión para la pasarela ADFweb CAN/CANopen.	60
Figura 46. Resistencia de shunt para la medida de la intensidad del stack.	62
Figura 47. Montaje del módulo EMS de Elite Power junto al stack.	62
Figura 48. Módulo Xcom-CAN. Array de <i>jumper</i> s (1) para la configuración de los pines de la interfaz CAN y <i>switches</i> (2) para la selección del protocolo de comunicaciones y modelo de batería.	64
Figura 49. Guía GEMMA, extraída de [42].	67
Figura 50. Modos de operación de la Microrred. Condiciones de transición.	70
Figura 51. Representación de un proceso de fermentación, extraído de [43].	74
Figura 52. Implementación de la programación para el proceso de fermentación siguiendo el modelo de PLCopen.	75
Figura 53. Secciones del programa del FLC en <i>Unity Pro</i> .	77
Figura 54. Código en SFC de la sección OMM.	78
Figura 55. Interfaz del bloque de pretratamiento CPH_MC.	79
Figura 56. Interfaz del bloque de control y comando CPH_CC.	80
Figura 57. Interfaz del bloque de pretratamiento LI_MC.	82
Figura 58. Interfaz del bloque de pretratamiento EZ_CLI_MC.	85
Figura 59. Interfaz del bloque de control y comando EZ_CLI_CC.	86
Figura 60. Interfaz del bloque MB_RM.	86

Figura 61. Petición de lectura para los registros Modbus del electrolizador mediante la función READ_VAR.	87
Figura 62. Petición de escritura para la escritura de la orden de marcha en el correspondiente registro Modbus del electrolizador mediante la función WRITE_VAR.	87
Figura 63. Interfaz del bloque de pretratamiento FC_MC.	93
Figura 64. Interfaz del bloque de control y comando FC_CC.	94
Figura 65. Interfaz del bloque de pretratamiento CFC_MC.	97
Figura 66. Interfaz del bloque de control y comando CFC_CC.	98
Figura 67. Interfaz del bloque de pretratamiento PS_MC.	101
Figura 68. Interfaz del bloque de control y comando PS_CC.	102
Figura 69. Interfaz del bloque de pretratamiento DCL_MC.	104
Figura 70. Interfaz del bloque de control y comando DCL_CC.	104
Figura 71. Interfaz del bloque de pretratamiento H2C_MC.	109
Figura 72. Interfaz del bloque de pretratamiento WC_MC.	110
Figura 73. Interfaz del bloque de control y comando H2C_WC_CC.	111
Figura 74. Interfaz del bloque para el control por histéresis de la presión en el buffer de salida del electrolizador.	112
Figura 75. Interfaz del bloque para el control por histéresis de la presión en el circuito de hidrógeno.	112
Figura 76. Bloque de pretratamiento PB_MC.	118
Figura 77. Interfaz del bloque de pretratamiento NHM_MC.	120
Figura 78. Interfaz del bloque de programa para el modo de operación <i>A1 Stop</i> .	129
Figura 79. Interfaz del bloque de programa para el modo de operación <i>F2 Starting Process</i> .	131
Figura 80. Flags para habilitación y deshabilitación de equipos.	132
Figura 81. Interfaz del bloque de programa 1 para el modo de funcionamiento <i>F1.2 Manual Function</i> .	134
Figura 82. Interfaz del bloque de programa 2 para el modo de funcionamiento <i>F1.2 Manual Function</i> .	135
Figura 83. Controles para el envío de comandos a la pila de hidrógeno (FC) en el Modo de Funcionamiento Manual y en el modo D1.2 Diagnosis.	136
Figura 84. Interfaces de los bloques de programa para el modo de funcionamiento <i>F1.1 Remote Function</i> .	139
Figura 85. Interfaz el bloque de programa para el modo de operación <i>F3 Stopping Sequence</i> .	142
Figura 86. Interfaz del bloque de programa para el modo de operación <i>D1.0 Emergency Stop Sequence</i> .	144
Figura 87. Interfaz del bloque de programa para el modo de operación <i>D1.1 Emergency State</i> .	145
Figura 88. Curva de degradación para baterías de litio ferrofosfato. Extraída de [46].	148
Figura 89. Perfil de tarifa horaria para la compra de energía a la red externa.	149
Figura 90. Perfil de generación fotovoltaica empleado en las simulaciones.	152
Figura 91. Perfil de demanda empleado en las simulaciones.	152
Figura 92. Montaje en Simulink para la simulación del algoritmo de control heurístico basado en reglas.	153
Figura 93. Curvas de potencia obtenidas con estado de carga inicial del 35% para el stack de baterías de litio y del 5% para los tanques de hidruros metálicos.	154
Figura 94. Curvas de SOC obtenidas con estado de carga inicial del 35% para el stack de baterías de litio y del 5% para los tanques de hidruros metálicos.	155

Figura 95. Curvas de potencia obtenidas con estado de carga inicial del 50% para el stack de baterías de litio y del 5% para los tanques de hidruros metálicos.	156
Figura 96. Curvas de SOC obtenidas con estado de carga inicial del 50% para el stack de baterías de litio y del 5% para los tanques de hidruros metálicos.	157
Figura 97. Curvas de potencia obtenidas con estado de carga inicial del 50% para el stack de baterías de litio y del 90% para los tanques de hidruros metálicos.	158
Figura 98. Curvas de SOC obtenidas con estado de carga inicial del 50% para el stack de baterías de litio y del 90% para los tanques de hidruros metálicos.	159
Figura 99. Curvas de potencia obtenidas con estado de carga inicial del 75% para el stack de baterías de litio y del 5% para los tanques de hidruros metálicos.	160
Figura 100. Curvas de SOC obtenidas con estado de carga inicial del 75% para el stack de baterías de litio y del 5% para los tanques de hidruros metálicos.	161
Figura 101. Curvas de potencia obtenidas con estado de carga inicial del 75% para el stack de baterías de litio y del 90% para los tanques de hidruros metálicos.	162
Figura 102. Curvas de SOC obtenidas con estado de carga inicial del 75% para el stack de baterías de litio y del 90% para los tanques de hidruros metálicos.	163
Figura 103. Curvas de potencia obtenidas con estado de carga inicial del 85% para el stack de baterías de litio y del 90% para los tanques de hidruros metálicos.	164
Figura 104. Curvas de SOC obtenidas con estado de carga inicial del 85% para el stack de baterías de litio y del 90% para los tanques de hidruros metálicos.	165
Figura 105. Curvas de potencia obtenidas en el ensayo experimental con la estrategia de control heurística basada en reglas.	167
Figura 106. Curvas de SOC obtenidas en el ensayo experimental con la estrategia de control heurística basada en reglas.	168
Figura 107. Communications system general scheme of the Microgrid of HyLab.	171
Figura 108. Acceso a las pantallas de la interfaz de usuario del FLC.	197
Figura 109. Pantalla para Selección de Modos de Operación.	199
Figura 110. Modo de operación inactivo (a) y activo (b).	199
Figura 111. Botón <i>Start</i> para orden de arranque de la Microrred.	199
Figura 112. Solicitud de encendido para la carga programable.	200
Figura 113. Solicitud de encendido para la fuente programable.	200
Figura 114. Botón <i>Remote Func Sel</i> para la selección del modo de funcionamiento remoto.	200
Figura 115. Botón <i>Manual Func Sel</i> para la selección del modo de funcionamiento manual.	201
Figura 116. Botón <i>Parada</i> para la solicitud de parada de la planta.	201
Figura 117. Botón <i>Error Ack</i> para reconocimiento de errores.	202
Figura 118. Pantalla <i>General View</i> .	203
Figura 119. Indicador para la monitorización del estado de funcionamiento de	205
Figura 120. Indicador para la monitorización de la potencia cedida o entregada al bus principal por el convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (CLI).	205
Figura 121. Indicadores para los estados de carga del stack de baterías de plomo (a), del stack de baterías de litio (b) y de los tanques de hidruros (c).	205
Figura 122. Indicadores para errores y avisos en los circuitos de hidrógeno y de agua y para actuaciones sobre la seta de emergencia.	205

Figura 123. Controles para la habilitación y deshabilitación de equipos.	206
Figura 124. Controles para la habilitación y deshabilitación de condiciones de error.	206
Figura 125. Pantalla para la gestión del convertidor DC/DC asociado al campo fotovoltaico.	207
Figura 126. Indicadores para la monitorización del estado del convertidor DC/DC asociado al campo fotovoltaico (CPH).	209
Figura 127. Indicadores para la monitorización de las magnitudes del convertidor DC/DC asociado al campo fotovoltaico (CPH).	209
Figura 128. Control para el envío de comandos al CPH en el Modo de Funcionamiento Manual y en el modo D1.2 Diagnosis.	209
Figura 129. Control para el envío de comandos al CPH en el Modo de Funcionamiento Remoto.	209
Figura 130. Indicador para la monitorización de los comandos enviados al CPH.	210
Figura 131. Pantalla para la gestión del stack de baterías de plomo (PB).	211
Figura 132. Indicadores para los estados de <i>warning</i> y <i>error</i> del stack de baterías de plomo (PB).	212
Figura 133. Indicadores para la monitorización de las magnitudes del stack de baterías de plomo (PB).	213
Figura 134. Indicador para los flags de aviso del stack de baterías de plomo (PB).	213
Figura 135. Indicador para los flags de error del stack de baterías de plomo (PB).	213
Figura 136. Panel para la gestión del stack de baterías de litio (LI).	214
Figura 137. Indicadores para los estados de funcionamiento del stack de baterías de litio (LI).	216
Figura 138. Indicadores para la monitorización de las magnitudes del stack de baterías de litio (LI).	216
Figura 139. Indicador para los flags de aviso del stack de baterías de litio (LI).	216
Figura 140. Indicador para los flags de error del stack de baterías de litio (LI).	216
Figura 141. Panel para la gestión del convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (CLI).	217
Figura 142. Indicadores para la monitorización del estado de funcionamiento del convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (CLI).	219
Figura 143. Indicadores para la monitorización de las magnitudes del convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (CLI).	219
Figura 144. Indicadores para la monitorización del registro con los flags de error del convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (CLI).	220
Figura 145. Indicadores para la monitorización del registro con los flags de protección del convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (CLI).	220
Figura 146. Controles para el envío de comandos y consignas de potencia al convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (CLI) en el Modo de Funcionamiento Manual y en el modo D1.2 Diagnosis.	220
Figura 147. Control para el arranque/parada automático y envío de consignas al convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (CLI) en el Modo de Funcionamiento Remoto.	221
Figura 148. Indicadores para la monitorización de los comandos y consignas enviados al convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (CLI).	221
Figura 149. Panel para la gestión del electrolizador (EL).	222
Figura 150. Monitorización de los estados de funcionamiento del electrolizador (EL).	225
Figura 151. Monitorización de los subestados de funcionamiento del electrolizador (EL).	226
Figura 152. Monitorización del estado del secador.	227
Figura 153. Indicadores para la monitorización de las magnitudes del electrolizador (EL).	227
Figura 154. Indicadores para la monitorización del registro con los flags de error del electrolizador (EL).	227

Figura 155. Controles para el envío de comandos y consignas de potencia al electrolizador (EL) en el Modo de Funcionamiento Manual y en el modo D1.2 Diagnosis.	228
Figura 156. Control para el arranque/parada automático y envío de consignas al electrolizador (EL) en el Modo de Funcionamiento Remoto.	228
Figura 157. Indicadores para la monitorización de los comandos y consignas enviados al electrolizador (EL).	228
Figura 158. Controles para la habilitación/deshabilitación y ajuste de umbrales para el control por histéresis de la presión de los stacks.	228
Figura 159. Panel para la gestión de la pila de hidrógeno (FC).	229
Figura 160. Indicadores para la monitorización del estado de la pila de hidrógeno (FC).	231
Figura 161. Indicadores para la monitorización de las magnitudes de la pila de hidrógeno (FC).	232
Figura 162. Indicadores para la monitorización de los registros con los flags de aviso y de error de la pila de hidrógeno (FC).	232
Figura 163. Controles para el envío de comandos a la pila de hidrógeno (FC) en el Modo de Funcionamiento Manual y en el modo D1.2 Diagnosis.	232
Figura 164. Indicador para la monitorización de los comandos enviados a la pila de hidrógeno (FC).	232
Figura 165. Controles para la habilitación/deshabilitación y ajuste de umbrales del control por histéresis de la presión del hidrógeno a la entrada de la pila.	233
Figura 166. Panel para la gestión del convertidor DC/DC asociado a la pila de hidrógeno (CPH).	234
Figura 167. Indicadores para la monitorización del estado de funcionamiento del convertidor DC/DC asociado a la pila de hidrógeno (CFC).	236
Figura 168. Indicadores para la monitorización de las magnitudes del convertidor DC/DC asociado a la pila de hidrogeno (CFC).	236
Figura 169. Indicadores para la monitorización de los registros con los flags de error del convertidor DC/DC asociado a la pila de hidrógeno (CFC).	236
Figura 170. Controles para el envío de comandos y consignas de potencia al convertidor DC/DC asociado a la pila de hidrógeno (CFC) en el Modo de Funcionamiento Manual y en el modo D1.2 Diagnosis.	237
Figura 171. Control para el envío de consignas de potencia al sistema <i>Fuel Cell</i> - DC/DC en el Modo de Funcionamiento Remoto.	237
Figura 172. Indicadores para la monitorización de los comandos y consignas enviados al convertidor DC/DC asociado la pila de hidrógeno (CFC).	237
Figura 173. Panel para la gestión de la fuente de alimentación programable (PS).	238
Figura 174. Indicadores para la monitorización de las magnitudes de la fuente de alimentación programable (PS).	239
Figura 175. Controles para el envío de consignas de tensión e intensidad a la fuente programable en el Modo de Funcionamiento Manual y en el modo D1.2 Diagnosis.	239
Figura 176. Controles para el envío de consignas de tensión e intensidad a la fuente programable en el Modo de Funcionamiento Remoto.	239
Figura 177. Indicadores para la monitorización de las consignas de tensión e intensidad enviadas a la fuente de alimentación programable PS.	239
Figura 178. Panel para la gestión de la carga programable (DCL).	240
Figura 179. Indicadores para la monitorización de las magnitudes de la carga programable (DCL).	241
Figura 180. Control para el envío de consignas de potencia a la carga programable en el Modo de Funcionamiento Manual y en el modo D1.2 Diagnosis.	241

Figura 181. Control para el envío de consignas de potencia a la carga programable en el Modo de Funcionamiento Remoto.	241
Figura 182. Indicador para la monitorización de la consigna de potencia enviada a la carga programable.	241
Figura 183. Panel para la gestión de los circuitos de hidrógeno y de agua.	242
Figura 184. Indicadores de error y de aviso para los circuitos de hidrógeno y de agua.	243
Figura 185. Flags para errores y avisos de los circuitos de hidrógeno y de agua.	243
Figura 186. Indicadores para la monitorización de las magnitudes de los circuitos de hidrógeno y de agua.	243
Figura 187. Controles para el comando de las electroválvulas de los circuitos de hidrógeno y de agua.	243
Figura 188. Variables para los límites de tensión y de SOC para el stack de baterías de plomo (PB).	244
Figura 189. Variables para los límites de tensión y de SOC para el stack de baterías de litio (LI).	246
Figura 190. Parámetros de protección para el convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (CLI).	247
Figura 191. Valores umbrales para el control por histéresis de la presión de los stacks en el electrolizador.	248
Figura 192. Variable para la habilitación y deshabilitación del control por histéresis de la presión de los stacks del electrolizador.	248
Figura 193. Valores umbrales para el control por histéresis de la presión en el circuito de hidrógeno.	248
Figura 194. Variable para la habilitación y deshabilitación del control por histéresis de la presión en el circuito de hidrógeno.	248
Figura 195. Variables para el escalado de las señales de consigna y de realimentación de la fuente de alimentación programable (PC).	249
Figura 196. Variables para el escalado de la consigna de potencia y las medidas de tensión e intensidad de la carga DC programable (CLD).	250
Figura 197. Variables para el escalado de las magnitudes medidas de los circuitos de hidrógeno y agua.	251
Figura 198. Curva característica <i>Caudal de H₂ - Potencia de Stacks</i> .	256
Figura 199. Ecuación de la curva característica <i>Caudal de H₂ - Potencia de Stacks</i> .	256
Figura 200. Curva característica <i>Consigna Porcentual - Potencia de Stacks</i> .	258
Figura 201. Ecuación de la curva característica <i>Consigna Porcentual - Potencia de Stacks</i> .	258

Acrónimos

ADEPA	<i>Agence nationale pour le DÉveloppement de la Productique Appliquée à l'industrie</i>
AICIA	Asociación de Investigación y Cooperación Industrial de Andalucía
BMS	Battery Management System
CAN	<i>Controller Area Network</i>
CFC	<i>Converter - H2 Fuel Cell</i> . Convertidor DC/DC asociado a la pila de hidrógeno.
CLI	<i>Converter - Lithium Battery Stack</i> . Convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio.
CPH	<i>Converter - PhotoVoltaic</i> . Convertidor DC/DC asociado al campo de paneles fotovoltaicos.
DC	<i>Direct Current</i>
DCL	<i>Programmable DC-Load</i> . Carga electrónica programable.
EMS	<i>Energy Management System</i>
ETSI	Escuela Técnica Superior de Ingeniería
EZ	<i>Electrolyzer</i> . Electrolizador.
FC	<i>H2 Fuel Cell</i> . Pila de hidrógeno.
FEC	<i>Front End Controller</i>
FLC	<i>First Level Controller</i>
GEMMA	<i>Guide d'Etude des Modes de Marches et d'Arrêts</i>
GEP-AICIA	Grupo de Electrónica de Potencia - AICIA
HMI	<i>Human Machine Interface</i>
HyLab	<i>Hydrogen Laboratory</i>
LCD	<i>Liquid Cristal Display</i>
LFP	<i>Lithium Ferrophosphate</i>
LI	<i>Lithium Battery Stack</i> . Stack de baterías de litio.
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
NI/h	Normal litros / hora
OMM	<i>Operation Modes Management</i>
OPC	<i>OLE for Process Control</i>
PB	<i>Lead-Acid Battery Stack</i> . Stack de baterías de plomo-ácido.
PEM	<i>Proton Exchange Membrane</i>
PID	<i>Proportional-Integral-Derivative controller</i>
PDO	<i>Process Data Object (CANopen)</i>
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
POU	<i>Program Organization Unit</i>
PS	<i>Programmable Power Supply</i> . Fuente de alimentación programable.
PV	<i>PhotoVoltaic Field</i> . Campo de paneles fotovoltaicos.
RS-485	<i>Recommended Standard - 485</i>
SCPI	<i>Standard Commands for Programmable Instruments</i>

SFC	<i>Sequential Function Chart</i>
SLC	<i>Second Level Controller</i>
SOC	<i>State Of Charge</i>
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

1 INTRODUCCIÓN. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO

Debido a la crisis climática generada por el calentamiento global, y que supone el mayor reto al que se enfrenta el ser humano a lo largo de su historia, la transición energética hacia fuentes de energía renovables que sustituyan al uso de combustibles fósiles ha dejado de ser un asunto estratégico para reducir la dependencia energética del mundo desarrollado con los países productores de petróleo, y ha pasado a convertirse en una cuestión de supervivencia para la humanidad, dada la urgente necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

De aquí a pocos años, la mayor parte de la demanda energética mundial, incluyendo el consumo de medios de desplazamiento para personas y mercancías como automóviles, aviones y barcos, habrá de ser cubierta mediante energía solar, principalmente fotovoltaica, y energía eólica. La generación eólica y fotovoltaica, que además habrá de ser complementada mediante sistemas de almacenamiento de energía, conducirá a una radical transformación en los sistemas de generación y transporte convencionales empleados hasta la fecha, que presentan una estructura totalmente piramidal (Figura 1) en cuya base se tienen los puntos de consumo, en la parte central las redes de transporte de alta, media y baja tensión, y en la cúspide grandes sistemas de generación como, por ejemplo, centrales térmicas, centrales hidroeléctricas, o centrales nucleares.

El uso de estructuras de generación y transporte convencionales sería perfectamente compatible con las grandes centrales fotovoltaicas o los parques eólicos, e incluso con grandes sistemas de almacenamiento basados en el uso de baterías o en el vector hidrógeno. Sin embargo, una estructura de generación y transporte distribuida (Figura 2), en la cual se disponga de una multitud de puntos de generación y almacenamiento cercanos a los puntos de consumo ofrece mayores ventajas. En primer lugar, en este tipo de estructuras se reducen notablemente las pérdidas de transporte. En segundo lugar, permite flujos de potencia bidireccionales, lo cual proporciona una gran flexibilidad para la gestión de la red, en contra de las estructuras convencionales en las que los flujos de potencia son siempre unidireccionales. Y en tercer lugar, el impacto medioambiental que producen las redes de generación y transporte distribuidas es mucho menor que el de las redes de generación y distribución convencionales.

Sin embargo, la ingeniería de control de las redes de generación y transporte distribuidas es mucho más compleja que la de las redes de generación y transporte convencionales. Es un aspecto técnico en el que se ha avanzado mucho en los últimos años, y para el cual se dispone de diferentes tipos de estrategias de control que ya han sido suficientemente maduras y probadas, que además incluyen la implementación de servicios de red en los puntos de generación distribuidos para cumplir con la normativa impuesta por el operador de la red de transporte a fin de mantener la integridad del sistema. No obstante, para que la generación distribuida llegue a ser una opción viable, se requieren códigos que armonicen las estrategias de control utilizadas y algún determinado estándar para gestionar la coordinación entre los diferentes puntos de generación, almacenamiento y consumo distribuidos. En la actualidad, se están realizando proyectos en esa línea, con el objetivo de definir dichos códigos y estándares, y un buen ejemplo de ello es el Proyecto KIBERnet (www.kiber-net.com), financiado por la Unión Europea.

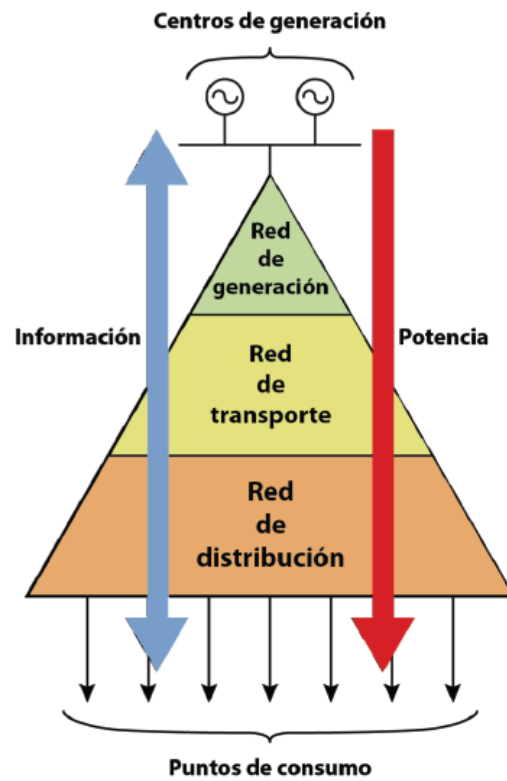


Figura 1. Estructura de los sistemas de generación y transporte convencionales. Extraído de [44].

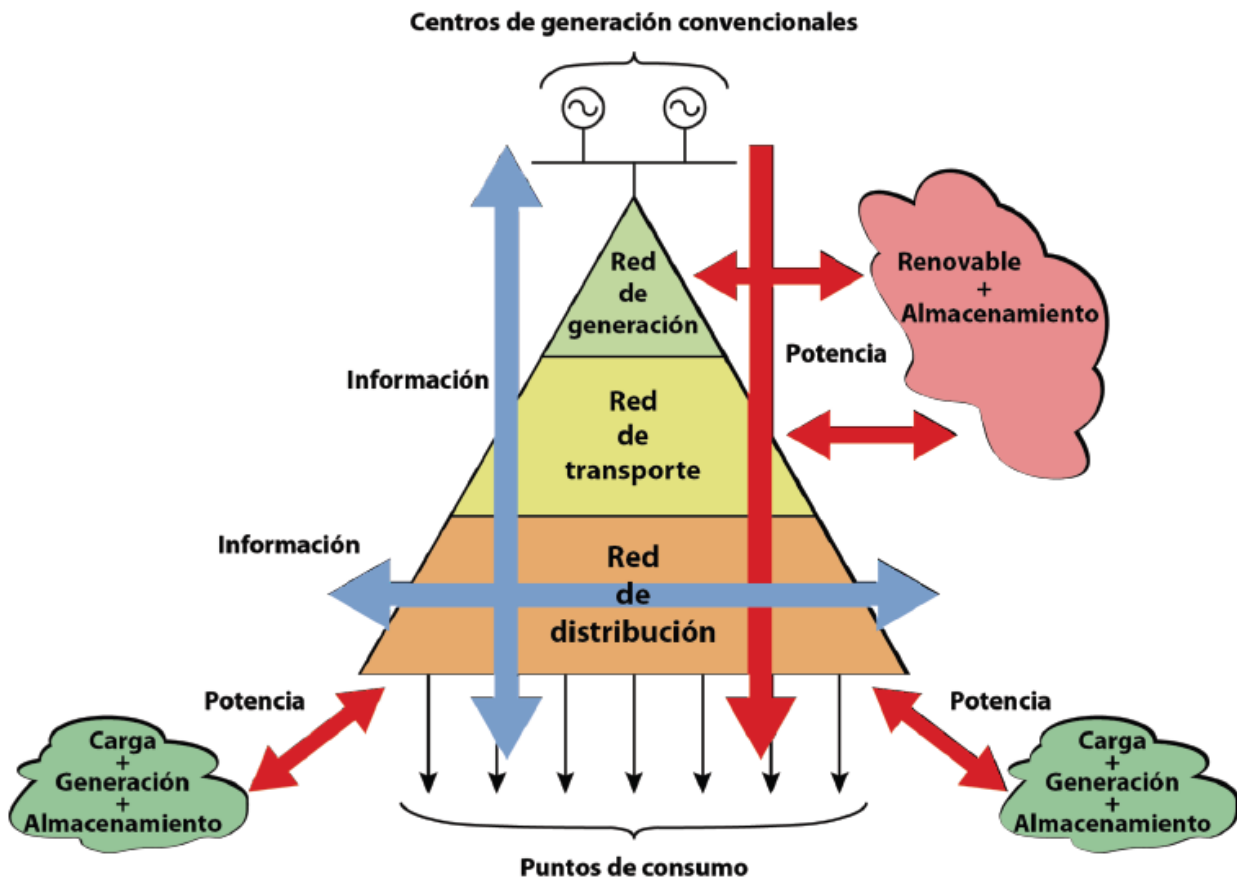


Figura 2. Estructura de los sistemas de generación y transporte distribuidos. Extraído de [44].

Dentro de las estructuras de generación y transporte distribuidos, cobra gran importancia el concepto de microrred (Figura 3). Según el Departamento de Energía de Estados Unidos, una microrred es un grupo de cargas y recursos de energía distribuidos interconectados, dentro de unos límites eléctricos claramente definidos, que actúa como una entidad controlable única con respecto a la red externa, y que puede conectarse o desconectarse de esta para operar tanto en modo isla como en modo conectado a red. Los recursos de energía distribuidos pueden ser fuentes de generación de energía como campos de paneles fotovoltaicos, aerogeneradores o microturbinas hidráulicas, y también pueden ser sistemas de almacenamiento basados en baterías, en el vector hidrógeno, o en dispositivos cinéticos.

Tal como se indica en la página web del Centro Nacional de Energías Renovables de España (www.cener.com), una microrred estará compuesta básicamente por los siguientes elementos:

- Una red de distribución, generalmente alterna de baja tensión, a la cual se conectan todas las fuentes de energía distribuidas y todas las cargas consumidoras.
- Una infraestructura de comunicación local.
- Un sistema jerárquico de control y gestión.
- Sistemas de almacenamiento de energía.
- Controladores inteligentes para cargas y consumos.

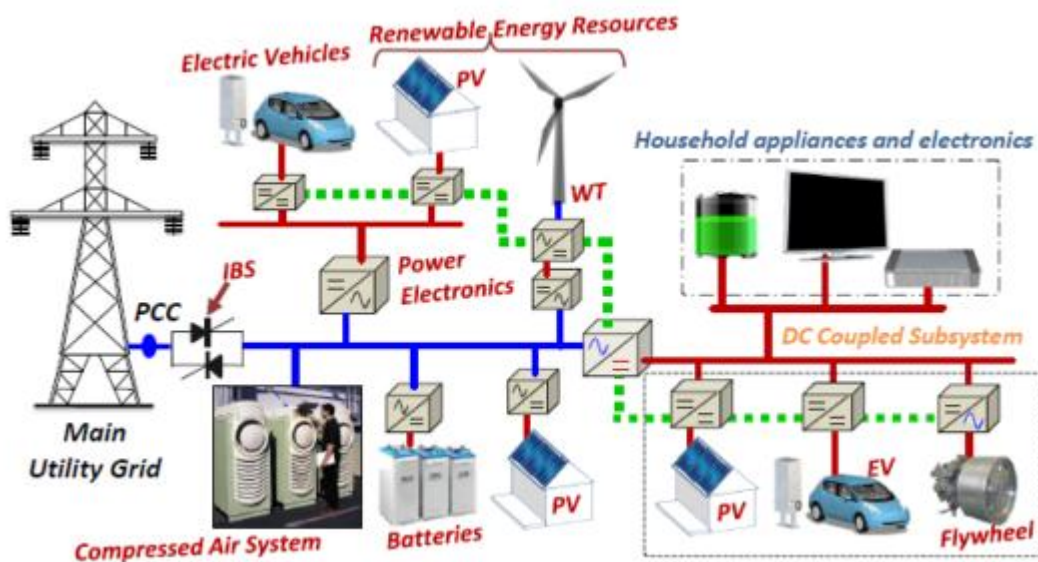


Figura 3. Ejemplo de microrred. Extraído de [45].

Existen microrredes experimentales que han sido concebidas y desarrolladas por universidades e instituciones públicas para investigar la integración de nuevos tipos de sistemas de generación y almacenamiento con los existentes actualmente, y también para la realización de ensayos con nuevas técnicas y estrategias de gestión energética. Algunos ejemplos notables de tales microrredes son la Microrred del Centro Nacional del Hidrógeno en España (www.cnh2.com) o la Microrred del Centro Tecnológico Balzay en Ecuador, en cuya construcción y puesta en marcha el autor del presente proyecto ha tenido la oportunidad de participar, o las microrredes de la Universidad Técnica de DELF, del Instituto Politécnico de Milano, o del Laboratorio de Hidrógeno de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla.

El presente Trabajo Fin de Máster ofrece una descripción del conjunto de trabajos efectuados para la integración de nuevos equipos y la automatización de la Microrred del Hylab de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla, realizados dentro del marco del proyecto "*Control Predictivo de Microrredes Reconfigurables con Almacenamiento Híbrido y Móvil*", de referencia [DPI2016-78338-R](#), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España, y cuyos responsables son los catedráticos Carlos Bordons Alba y Miguel Ángel Ridao Carlini.

Los objetivos que se han establecido para el presente proyecto, y que serán expuestos de manera más detallada a lo largo del presente documento, son los siguientes:

- Integración de nuevos equipos y sistemas de generación y almacenamiento en la Microrred, para su monitorización y comando remotos desde la arquitectura de control de la que actualmente se dispone. Dichos equipos y sistemas son un electrolizador, una pila de hidrógeno, un stack de baterías de litio, y un campo de paneles fotovoltaicos con un convertidor DC/DC asociado.
- Automatización de la Microrred mediante una nueva programación para sus sistemas de control que implemente un conjunto más completo de modos de operación para la planta, y que ofrezca conectividad con un nivel de control superior en el que puedan ejecutarse nuevos algoritmos y estrategias de gestión energética. Para la definición de dichos modos de operación se empleará la guía GEMMA (*Guide d'Etude des Modes de Marches et d'Arrêts*), y para el desarrollo de la programación el modelo de programación estructurada propuesto por PLCopen (www.plcopen.org) para PLC. Para testear las funcionalidades del nivel de control para algoritmos de gestión energética, se diseñará un control heurístico basado en reglas y se realizará un ensayo experimental con la Microrred.

2 DESCRIPCIÓN DE LA MICRORRED EXPERIMENTAL DEL HYLAB

2.1 Antecedentes

La Microrred experimental del laboratorio HyLab es una instalación desarrollada por el Departamento de Termotecnia de la Universidad de Sevilla, con el propósito de investigar la integración de fuentes de energía renovables y sistemas de almacenamiento convencionales basados en baterías en microrredes que empleen el vector hidrógeno como principal sistema de almacenamiento. Su diseño y construcción fueron realizados en el marco del Proyecto "*Aplicación de técnicas novedosas de control al almacenamiento de energía eléctrica de origen renovable utilizando hidrógeno*", de referencia [DPI2007-66718-C04-03](#), financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia de España, y cuyo responsable fue el Catedrático [Manuel Felipe Rosa Iglesias](#).

Tal y como lo explica el Doctor [Luis Valverde Isorna](#) en su [Tesis Doctoral](#) [1], la Microrred del HyLab es una instalación experimental concebida con una estructura modular que le confiere un alto grado de flexibilidad en relación a las topologías de sistemas y componentes que pueden ser investigados. Permite implementar y estudiar diferentes modos de operación y estrategias de control, así como desarrollar y validar experimentalmente modelos matemáticos tanto de los equipos individuales como de determinadas configuraciones.

A lo largo de estos últimos años, sobre la Microrred del HyLab se han efectuado diversas ampliaciones y actualizaciones, con la finalidad de poder llevar a cabo nuevos proyectos de investigación. La Microrred original (Figura 4), puesta en operación en el año 2010, disponía de una pila de combustible, un electrolizador, un tanque de hidruros metálicos para el almacenamiento del hidrógeno, dos convertidores DC/DC para adaptar las tensiones e intensidades de la pila y del electrolizador, un banco de baterías de plomo-ácido, y de una fuente y una carga electrónica programables para simular perfiles de generación o de demanda. Actualmente, la Microrred dispone, además, de un campo de paneles fotovoltaicos, un banco de baterías de litio con un convertidor DC/DC asociado, y la pila y el electrolizador han sido sustituidos por una nueva pila y un nuevo electrolizador del fabricante Heliocentris. En el presente trabajo, se describen, entre otras cosas, los trabajos de integración realizados para algunos de estos nuevos sistemas, desarrollados dentro del marco del Proyecto "*Control Predictivo de Microrredes Reconfigurables con Almacenamiento Híbrido y Móvil*", de referencia [DPI2016-78338-R](#), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España, y cuyos responsables son los catedráticos [Carlos Bordons Alba](#) y [Miguel Ángel Ridao Carlini](#).

A día de hoy, y según se expone en su [página web oficial](#), la Microrred experimental del laboratorio HyLab ha permitido realizar hasta nueve proyectos de investigación, financiados por instituciones europeas, estatales y autonómicas, y llevados a cabo conjuntamente por el Departamento de Termotecnia y el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Sevilla. Como resultado de estos proyectos, se han publicado 13 artículos y 9 ponencias en congresos, y se han realizado 3 trabajos de fin de grado, 3 trabajos de fin de máster y 3 tesis doctorales.

En los siguientes subapartados, se indican los proyectos que se han realizado con la Microrred experimental del HyLab, y se enumeran y referencian las publicaciones, trabajos académicos y tesis doctorales que se han generado.

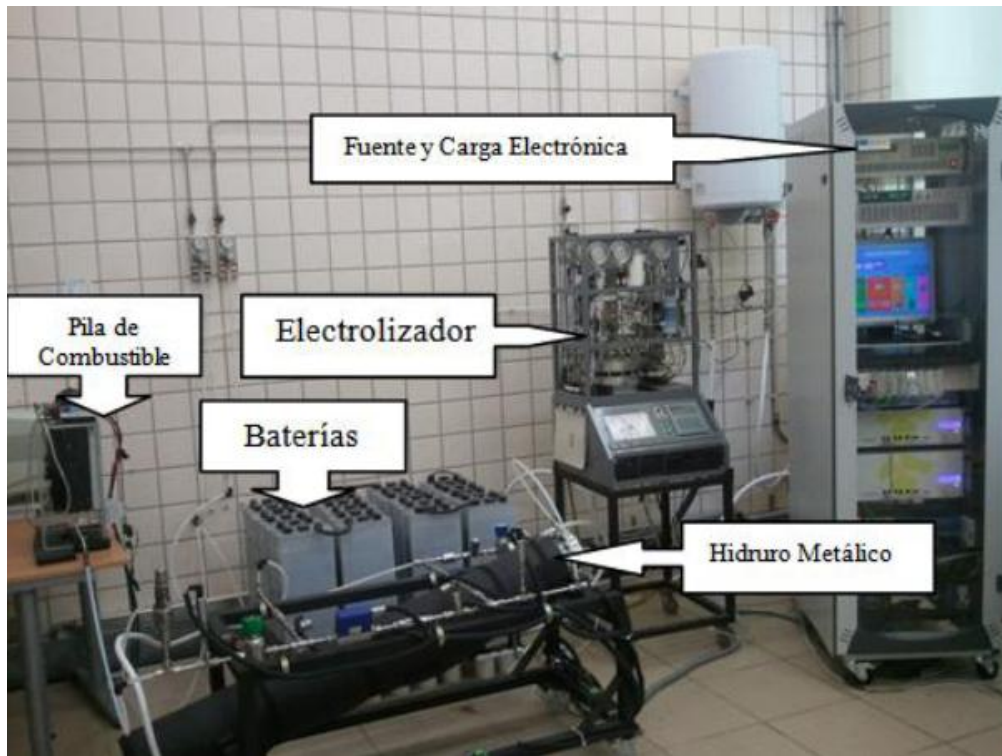


Figura 4. Microrred experimental del laboratorio HyLab original. Imagen extraída de [1].



Figura 5. Microrred experimental del laboratorio HyLab en la actualidad.

2.2 Proyectos realizados con la Microrred experimental del laboratorio HyLab

MODEL PREDICTIVE CONTROL OF RECONFIGURABLE MICROGRIDS WITH HYBRID AND MOBILE ENERGY STORAGE (2016-2019) [DPI2016-78338-R](#)

- **Funded by:** Spanish Ministry of Economy and Competitiveness.
- **Partners:**
 - University of Seville - Thermal Engineering Group.
 - University of Seville - Automatic and Systems Engineering Department.
 - Centro Nacional del Hidrógeno (CNH2).

MODEL PREDICTIVE CONTROL OF DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS WITH RENEWABLE SOURCES AND STATIONARY AND MOBILE STORAGE (2013-2016) [DPI2013-46912-C2-1-R](#)

- **Funded by:** Spanish Ministry of Economy and Competitiveness
- **Partners:**
 - University of Seville - Thermal Engineering Group.
 - University of Seville - Automatic and Systems Engineering Department.
 - Centro Nacional del Hidrógeno (CNH2).

OPTIMIZING THE INTEGRATION OF RENEWABLE ENERGY WITH HYDROGEN VECTOR (2013-2015)

- **Funded by:** Spanish Ministry of Economy and Finance (FEDER)
- **Partners:**
 - University of Seville - Thermal Engineering Group.
 - University of Seville - Automatic and Systems Engineering Department.

MODEL PREDICTIVE CONTROL OF DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS WITH RENEWABLE SOURCES AND STATIONARY AND MOBILE STORAGE. COOPERA. (2014-2017) [DPI2013-46912-C2-1-R](#)

- **Funded by:** Spanish Ministry of Economy and Innovation.
- **Partners:**
 - University of Seville - Thermal Engineering Group.
 - University of Seville - Automatic and Systems Engineering Department.
 - National Institute of Aerospace Technology of Spain (INTA).

BIOSTIRLING- A COST EFFECTIVE AND EFFICIENT APPROACH FOR A NEW GENERATION OF SOLAR DISH STIRLING PLANTS BASED ON STORAGE AND HYBRIDIZATION ([FPT-ENERGY-2013](#))

- **Funded by:** FEDER (5,3 M€)
- **Partners:**
 - Fraunhofer - Gesellschaft.
 - Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).
 - Gestamp Solar Steel.
 - Alener Solar S.L.
 - Fundación Centro Tecnológico Avanzado de Energías Renovables de Andalucía (CTAER).
 - University of Seville - Thermal Engineering Group.
 - University of Seville - Automatic and Systems Engineering Department.
 - Instituto de Telecomunicações.
 - Logica E.M. S.A.
 - Max-Planck-Gesellschaft.
 - Astron.
 - Tampere University of Technology.
 - Cleanergy.
 - Machttechnik Toughtrough.

OPTIMAGRID. SISTEMAS INTELIGENTES DE OPTIMIZACIÓN Y AUTOGESTIÓN DE MICRO-REDES CON ENERGÍAS RENOVABLES APLICADAS A ÁREAS DE LA ZONA SUDOE ([ES-0790/2011](#))

- **Funded by:** FEDER (1,2 M€)
- **Partners:**
 - University of Seville - Thermal Engineering Group.
 - University of Seville - Automatic and Systems Engineering Department.
 - University of San Jorge.
 - Fundación Hidrógeno Aragón.
 - Universidade Técnica de Lisboa
 - Fundación CIRSE
 - Asociación de Investigación y Cooperación Industrial de Andalucía (AICIA).

EXPERIMENTAL VALIDATION OF MODEL PREDICTIVE CONTROL TECHNIQUES IN DISTRIBUTED GENERATION ([DPI2010-21589-C05-03](#)). 2011

- **Funded by:** Ministry of Science and Technology (59.000 €)
- **Partners:**
 - University of Seville - Thermal Engineering Group.
 - University of Seville - Automatic and Systems Engineering Department.
 - University of Almería.
 - University of Valladolid.

ANALYSIS OF THE OPERATION MODES FOR THE ELECTRICITY MANAGEMENT FROM RENEWABLE ENERGY INCORPORATING HYDROGEN STORAGE (2010)

- **Funded by:** Junta de Andalucía (457.420 €)
- **Partners:**
 - Universidad de Sevilla.
 - Hynergreen Technologies S.A. (Abengoa).

APPLICATION OF NOVEL CONTROL TECHNIQUES TO THE ELECTRICITY STORAGE FROM RENEWABLE ENERGY USING HYDROGEN. [DPI2007-66718-C04-03](#)

- **Funded by:** Ministry of Science and Technology (96.800 €)
- **Partners:**
 - University of Seville - Thermal Engineering Group.
 - University of Seville - Automatic and Systems Engineering Department.
 - University of Almería.
 - University of Valladolid.

2.3 Publicaciones, trabajos académicos y tesis doctorales

INTERNATIONAL JOURNAL PUBLICATIONS

1. P. Velarde, L. Valverde, J.M. Maestre, C. Ocampo-Martinez, C. Bordons, *"On the comparison of stochastic model predictive control strategies applied to a hydrogen-based microgrid"*, Journal of Power Sources, Volume 343, 1 March 2017, Pages 161-173, ISSN 0378-7753
2. L. Valverde, F. Rosa, C. Bordons, J. Guerra, *"Energy Management Strategies in hydrogen Smart-Grids: A laboratory experience, International Journal of Hydrogen Energy"*, Volume 41, Issue 31, 17 August 2016, Pages 13715-13725
3. Paulo R.C. Mendes, Luis Valverde Isorna, Carlos Bordons, Julio E. Normey-Rico, *"Energy management of an experimental microgrid coupled to a V2G system"*, Journal of Power Sources, Volume 327, 30 September 2016, Pages 702-713, 2016.
4. M. Petrollese; L. Valverde; D. Cocco; G. Cau; J. Guerra, *"Real-time integration of Optimal Generation Scheduling with MPC for the energy management of a Renewable hydrogen-based microgrid."* Applied Energy, 6th October, 2015. Accepted.
5. F. García; L. Valverde, C. Bordons. *"Optimal Load Sharing of Hydrogen-Based Microgrids with Hybrid Storage Using Model Predictive Control"*. IEEE. Trans. On Industrial Electronics., 2015.
6. Valverde, L.; Pino, F. J.; Guerra, Jose.; Rosa, F., *"Definition, Analysis and Experimental Investigation of Operation Modes in Hydrogen-Renewable-based Power Plants Incorporating Hybrid Energy Storage"*. Energy Conversion and Management, 2nd August, 2015.
7. Valverde, L.; Ali, D.; Hogg, D.; Abdel-Wahab, M.; *"Modelling the Performance of Wind-Hydrogen Energy Systems: Case Study the Hydrogen Office in Scotland/UK"*. Accepted 4 August, 2015. Renewable & Sustainable Energy Reviews.
8. Valverde, L.; Bordons, C.; Rosa, F.; Guerra, J.; *"Integration of Fuel Cell technologies in Renewable Energy microgrids optimizing operational costs and durability"*. Accepted July 22, 2015. Transactions on Industrial Electronics. <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2015.2465355>.
9. Carlos Bordons, Félix García-Torres, Luis Valverde. *"Gestión Óptima de la Energía en Microrredes con Generación Renovable"*, Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, Volume 12, Issue 2, April–June 2015, Pages 117-132.
10. Pereira, M.; Limon, D.; Munoz de la Pena, D.; Alamo, T.; Valverde, L., *"Periodic economic control of a non-isolated micro-grid,"* IEEE Transactions on Industrial Electronics, , vol.PP, no.99, pp.1,1. 2015.
11. L. Valverde, F. Rosa, A.J. del Real, A. Arce, C. Bordons, *"Modeling, simulation and experimental set-up of a renewable hydrogen-based domestic microgrid"*, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 38, Issue 27, 10 September 2013, Pages 11672-11684.
12. Valverde, L.; Rosa, F.; Bordons, C., *"Design, Planning and Management of a Hydrogen-Based Microgrid,"* IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol.9, no.3, pp.1398, 1404, Aug. 2013.
13. Fco. Javier Pino, Luis Valverde, Felipe Rosa, *"Influence of wind turbine power curve and electrolyzer operating temperature on hydrogen production in wind–hydrogen systems"*, Journal of Power Sources, Volume 196, Issue 9, 1 May 2011, Pages 4418-4426.

INTERNATIONAL CONFERENCES

1. L. Valverde, F.J. Pino, F. Rosa, J. Guerra, *"Simulation and Experimental evaluation of Operating Modes in a hydrogen-based microgrid"*, EHEC 2014- European Hydrogen Energy Conference. 12-14th March, 2014, Seville, Spain.
2. Pereira, M.; Limon, D.; Alamo, T.; Valverde, L.; Bordons, C., *"Economic model predictive control of a smartgrid with hydrogen storage and PEM fuel cell,"* Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE , vol., no., pp.7920,7925, 10-13 Nov. 2013.
3. Salazar, J.; Tadeo, F.; Valverde, L., *"Predictive control of a renewable energy microgrid with operational cost optimization,"* Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE , vol., no., pp.7950,7955, 10-13 Nov. 2013.
4. Valverde, L.; Ali, D.; Abdel-Wahab, M.; Guerra, J.; Hogg, D.F., *"A technical evaluation of Wind-Hydrogen (WH) demonstration projects in Europe,"* Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2013 Fourth International Conference on , vol., no., pp.1098,1104, 13-17 May 2013
5. Valverde, L.; Bordons, C.; Rosa, F., *"Power management using model predictive control in a hydrogen-based microgrid,"* IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society , vol., no., pp.5669,5676, 25-28 Oct. 2012

NATIONAL JOURNAL PUBLICATIONS

1. Luis Valverde, F. Rosa, F.J. Pino, E. López, J. Guerra, *"Diseño, Montaje y Puesta en Funcionamiento de un Laboratorio de Hidrógeno y Pilas de Combustible"* Energía. 2010. pp. 44-52, 2010

NATIONAL CONFERENCES

1. Luis Valverde Isorna, Carlos Bordons, Alejandro del Real, *"Técnicas de Control Predictivo para la gestión eficiente de micro-redes de energías renovables"*. X Simposio CEA de Ingeniería de Control. ISBN 978-84-615-7398-1. pp. 19-28. 1-2 Marzo 2012
2. L. Valverde, F. Rosa, A. Iranzo, F.J. Pino *"Diseño de un Entorno de Experimentación para Producción y Almacenamiento de Hidrógeno a Partir de Fuentes Renovables"*. Conappice 2010 - IV CONGRESO NACIONAL DE PILAS DE COMBUSTIBLE, Sevilla. Pag. 343-346.
3. L. Valverde, F.J. Pino, J.R. López, F. Rosa , *"A new electrical integration topology for renewable energy systems incorporating hydrogen storage"*, HYCELTEC 2011, III IBERIAN SYMPOSIUM ON HYDROGEN, FUEL CELLS AND ADVANCED BATTERIES. Zaragoza, 27-30 Junio, 2010

DOCTORAL DISSERTATIONS

1. **VALVERDE ISORNA, Luis.** *"Gestión de energía en sistemas con fuentes renovables y almacenamiento de energía basado en hidrógeno mediante control predictivo"*. Doctoral Thesis. University of Seville. 2013.
2. **GARCÍA TORRES, Félix.** *"Advanced control of renewable energy microgrids with hybrid energy storage system"*. Doctoral Thesis. University of Seville. 2015.
3. **VELARDE RUEDA, Pablo Aníbal.** *"Stochastic model predictive control for robust operation of distribution systems"*. Doctoral Thesis. University of Seville. 2017.

MASTER THESIS

1. **VALVERDE ISORNA, Luis.** *"Estudio sobre el uso de convertidores DC/DC en instalaciones de almacenamiento de energía eléctrica de origen renovable"*. Master Thesis. University of Seville. 2010.
2. **VELARDE RUEDA, Pablo Aníbal.** *"Implementación y comparación de técnicas de control predictivo"*

robustas". Master Thesis. University of Seville. 2014.

3. **FERNÁNDEZ GÓMEZ, Pedro Antonio.** *"Automatización de una microrred con doble banco de baterías"*. Master Thesis. University of Seville. 2018.

FINAL DEGREE PROJECTS

1. **MARZO ROMÁN, Luis.** *"Development of a graphical simulator for microgrids with renewable energies"*. Final Degree Project. University of Seville. 2017.
2. **CORONEL DOMÍNGUEZ, Manuel Ángel.** *"Automatización de micro-red eléctrica con fuentes renovables y almacenamiento de hidrógeno"*. Final Degree Project. University of Seville. 2011.
3. **RONDÁN GALÁN, José María.** *"Automatización, operación y caracterización de un electrolizador AEM"*. Final Degree Project. University of Seville. 2016.

2.4 Descripción general de la Microrred

La Microrred experimental del laboratorio HyLab está formada por un conjunto de fuentes de generación y demanda, y de sistemas de almacenamiento conectados a un bus principal, tal como se muestra en el esquema de la Figura 6.

La Microrred experimental del laboratorio HyLab está integrada por los siguientes equipos y sistemas:

- Un stack de baterías de plomo-ácido con capacidad para almacenar 18.048 kWh.
- Un electrolizador con capacidad para producir hasta 500 NI/h de hidrógeno para un consumo de potencia de 2.9 kW.
- Una pila de hidrógeno con capacidad para generar 1200 W con un consumo de hidrógeno de 15 NI/minuto.
- Dos tanques de hidruros metálicos con capacidad para almacenar hasta 14 Nm³ de hidrógeno.
- Un circuito hidráulico provisto de un termo eléctrico y de conexión a la red local de suministro, configurable tanto para refrigerar como para calentar los tanques de hidruros metálicos.
- Un circuito de hidrógeno, para el almacenamiento del hidrógeno producido por el electrolizador en los tanques de hidruros, y para la alimentación de la pila de hidrógeno tanto desde los tanques de hidruros como de una fuente externa.
- Un convertidor DC/DC asociado a la pila de hidrógeno.
- Una fuente de alimentación programable DC, para emular perfiles de generación fotovoltaica y eólica, y también la compra de energía eléctrica a la red externa.
- Una carga electrónica programable DC, para emular la demanda de potencia y la inyección del exceso de potencia a la red externa.
- Un campo de paneles fotovoltaicos con capacidad para generar 5 kWp.
- Un convertidor DC/DC monodireccional asociado al campo de paneles fotovoltaicos.
- Un stack de baterías de litio con capacidad para almacenar 19.2 kWh.
- Un convertidor DC/DC bidireccional asociado al stack de baterías de litio.

Todo el conjunto de sistemas de generación y almacenamiento de la Microrred se encuentra conectado a un bus principal DC no regulado en tensión, tal como se muestra en el esquema de la Figura 6. Tanto la pila de hidrógeno como el electrolizador, el stack de baterías de litio y el campo fotovoltaico precisan de convertidores DC/DC para adaptar sus tensiones e intensidades al bus principal. El stack de baterías de plomo está directamente conectado al bus, con lo cual es el dispositivo que fija su tensión, y está ideado para atenuar los regímenes transitorios que puedan producirse en el balance de potencias del bus ante cambios en la generación o en la demanda.

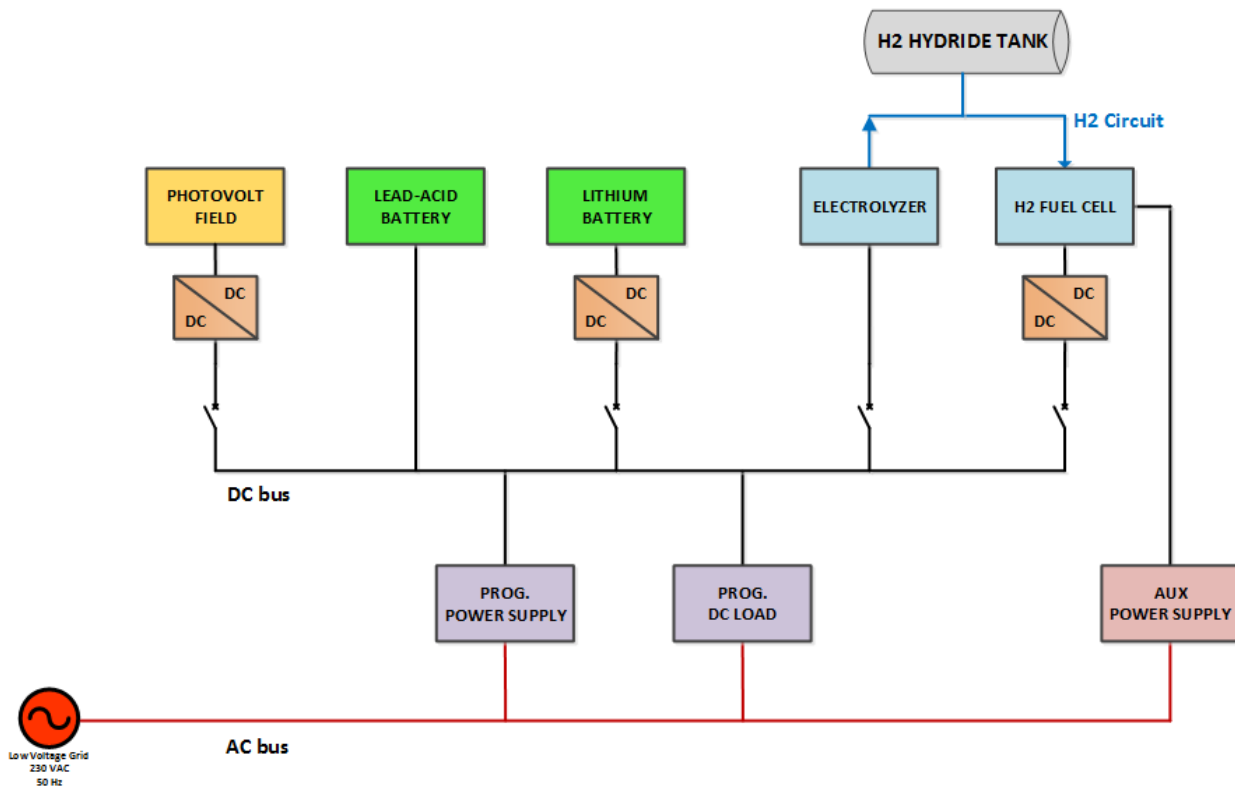


Figura 6. Esquema de conexionado eléctrico de la Microrred experimental del laboratorio HyLab.

En adelante, se empleará la siguiente nomenclatura para hacer referencia a los equipos de la Microrred en esquemas y anexos:

- **PV (PhotoVoltaic).** Campo de paneles fotovoltaicos.
- **CPH (Converter - PHotovoltaic).** Convertidor DC/DC asociado al campo de paneles fotovoltaicos.
- **PB (Lead).** Stack de baterías de plomo.
- **LI (Lithium).** Stack de baterías de litio.
- **CLI (Converter - Lithium).** Convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio.
- **EZ (Electrolyzer).** Electrolizador.
- **FC (H2 Fuel Cell).** Pila de hidrógeno.
- **CFC (Converter - H2 Fuel Cell).** Convertidor DC/DC asociado a la pila de hidrógeno.
- **PS (Programmable power Supply).** Fuente de alimentación programable DC.
- **DCL (Programmable DC Load).** Carga electrónica DC programable.

En el siguiente apartado, se ofrecen descripciones más completas de cada uno de los equipos y sistemas que integran la Microrred experimental del laboratorio HyLab.

2.5 Equipos y sistemas de la Microrred

2.10.1 Campo de paneles fotovoltaicos

Como fuente de energía renovable la Microrred dispone de un campo de paneles fotovoltaicos, instalado en la azotea del Edificio T2 de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Está formado por dos arrays paralelos, cada uno con 10 módulos fotovoltaicos A-250M de silicio monocristalino manufacturados por la compañía Atersa del Grupo Elecnor (Figura 7).

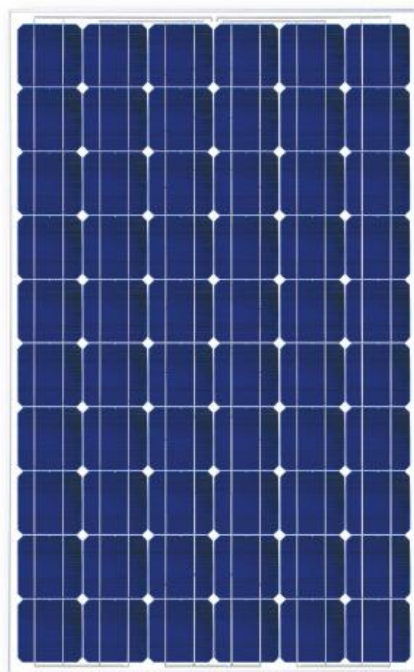


Figura 7. Módulo fotovoltaico A-250M de Atersa - Grupo Elecnor. Imagen extraída de [38].

Cada módulo 1-250M puede proporcionar una potencia máxima de 250 W, a una tensión y una intensidad de 30.35 V y 8.24 A respectivamente, con una eficiencia del 15.35%. En las Figura 8, Figura 9 y Figura 10, se muestran sus curvas I-V, extraídas de la hoja de datos proporcionada por el fabricante [38]. En la Tabla 1, se indican las características del módulo.

La configuración empleada para la interconexión de los módulos fotovoltaicos permite conseguir una potencia máxima de 5 kW a una tensión de 303.5 V y una intensidad de 16.48 A, con una tensión de circuito abierto de hasta 376.2 V y una intensidad de cortocircuito de hasta 17.58 A.

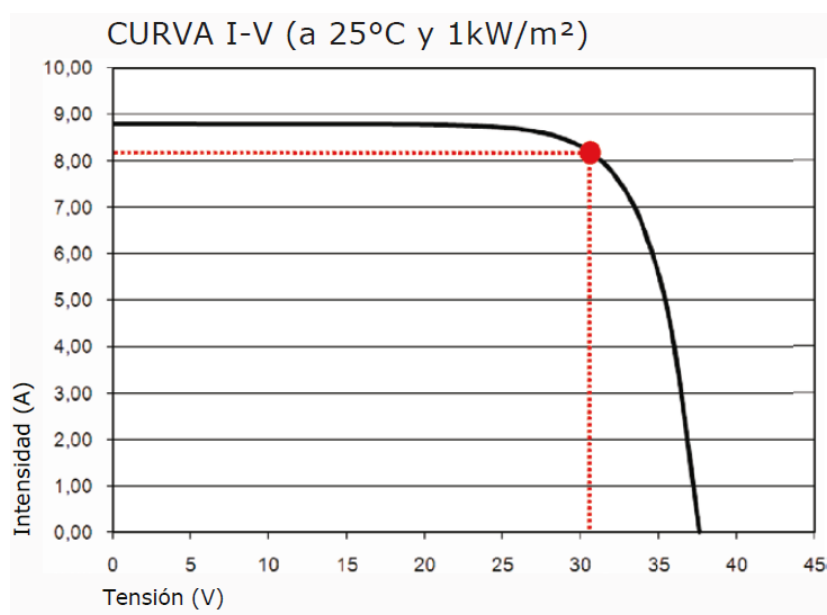


Figura 8. Curva I-V del módulo A-250M de Atersa - Grupo Elecnor, para una temperatura ambiente de 25 °C y una irradiancia de 1 kW/m².

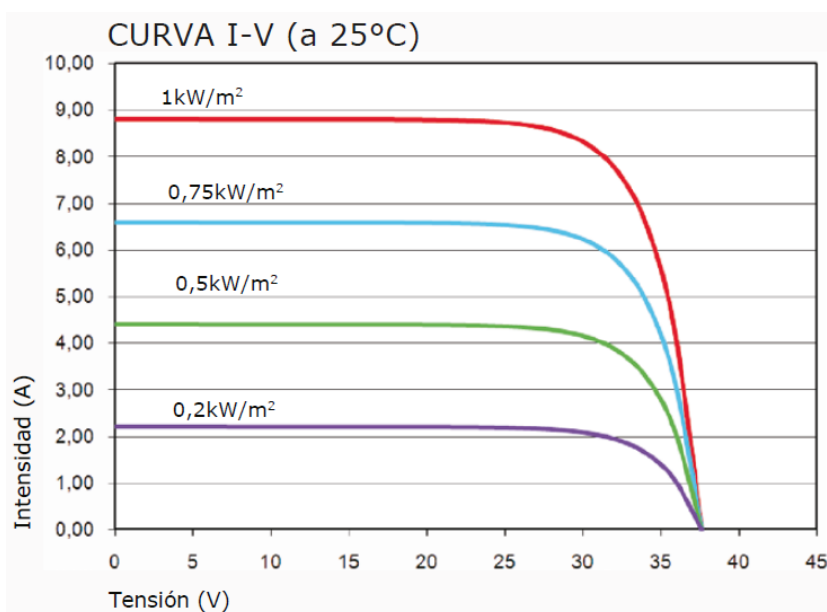


Figura 9. Curvas I-V del módulo A-250M de Atersa - Grupo Elecnor, para diferentes niveles de irradiancia.

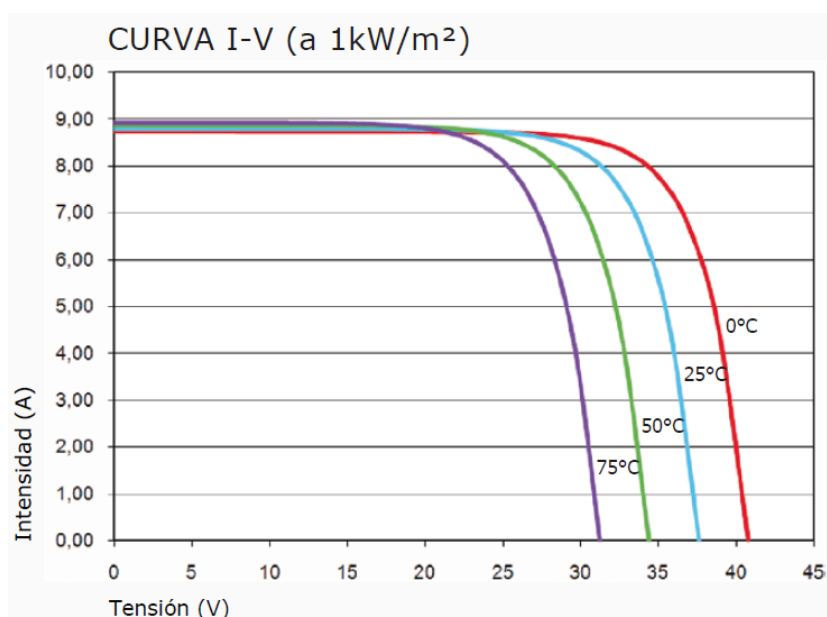


Figura 10. Derivas térmicas en la curva I-V del módulo A-250M de Atersa - Grupo Elecnor, para una irradiancia de 1 kW/m².

Tabla 1. Características del módulo A-250M de Atersa - Grupo Elecnor.

Características Módulo A-250M	
Características eléctricas (STC: 1 kW/m², 25 °C ± 2°C y AM 1.5)	
Potencia Nominal (0 / +5 W)	250 W
Eficiencia del módulo	15,35 %
Intensidad en el MPP (I_{mp})	8.24 A
Tensión en el MPP (V_{mp})	30.35 V
Intensidad de cortocircuito (I_{sc})	8.79 A
Tensión en circuito abierto (V_{oc})	37.62 V
Parámetros térmicos	
Coeficiente de temperatura de I_{sc} (α)	0.03 % /°C
Coeficiente de temperatura de V_{oc} (β)	-0.34 % /°C
Coeficiente de temperatura de P (γ)	-0.43 % /°C
Características físicas	
Dimensiones (mm ± 2 mm)	1645 x 990 x 40
Peso	21.5 kg
Área	1.63 m ²
Tipo de célula	Monocristalina 156x156 mm (6 pulgadas)
Células en serie	60 (6x10)
Cristal delantero	Cristal templado ultra claro de 4 mm
Marco	Aleación de aluminio pintado en poliéster
Caja de conexiones / Opcional	QUAD IP54 / QUAD IP65
Cables	Cable solar 4 mm ² 1100 mm
Conectores	MC4 o combinable MC4
Rango de funcionamiento	
Temperatura	-40 °C a +85 °C
Máxima tensión del sistema / Protección	1000 V / CLASS II
Carga máxima viento / nieve	2400 Pa (130 km/h) / 5400 Pa (551 kg/m ²)
Máxima corriente inversa (IR)	15.1 A

2.10.2 Convertidor DC/DC Studer Variostring VS-70 para campo de paneles fotovoltaicos

Para adaptar la tensión y la intensidad del campo de paneles fotovoltaicos al bus principal de la Microrred se emplea un cargador solar Studer Innotec VarioString VS-70 (Figura 11), configurado para ser utilizado como convertidor DC/DC, con el bus de entrada cableado al campo de paneles fotovoltaicos y el bus de salida al bus principal de la Microrred.



Figura 11. Cargador solar VarioString VS-70 de Studer Innotec.

El dispositivo VarioString VS-70 puede proporcionar una potencia máxima de 4.2 kW, a unos valores máximos de tensión e intensidad en el bus de entrada de hasta 600 V y 13 A respectivamente, proporcionando a su salida una tensión nominal de 48 V, variable entre 38 y 68 V, y una intensidad de hasta 70 A. En la Figura 12, se muestran sus curvas de intensidades de entrada (*PV current*) y de salida (*Battery current*) en función de la tensión de entrada (*PV Voltage*), para una tensión de salida típica de 52 V. Su eficiencia máxima es cercana al 98%.

El dispositivo VarioString VS-70 no opera con consignas de potencia. En lugar de ello, emplea un algoritmo MPPT (Maximum Power Point Tracking), para proporcionar la máxima potencia disponible del campo fotovoltaico. Ofrece cuatro tipos distintos de algoritmos MPPT opcionales:

- **Algoritmo MPPT por Método de Observación y Perturbación (P&O, *Perturb and Observe Method*).**
- **Algoritmo MPPT por Método de la Tensión de Circuito Abierto Fraccional (OC ratio).**
- **Algoritmo MPPT por Método de la Tensión Fotovoltaica Fija (Upv fixed).**
- **Algoritmo MPPT LSF (propiedad de Studer Innotec)**

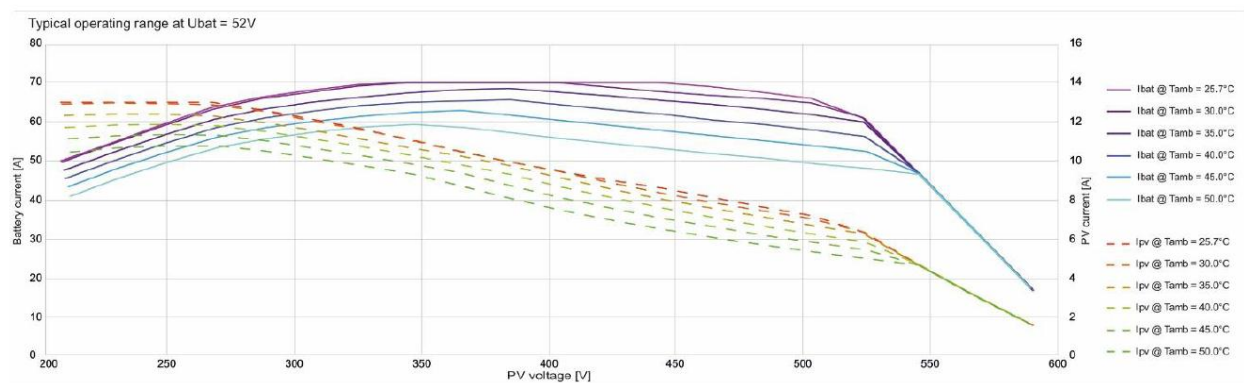


Figura 12. Rangos de funcionamiento del cargador solar VarioString VS-70 de Studer Innotec.

Para la monitorización, configuración y comando del dispositivo VarioString VS-70 se dispone de un módulo accesorio RCC-02 (Figura 13), también de Studer. El módulo RCC-02 permite monitorizar el estado de operación del VS-70, así como la medida de tensiones e intensidades de entrada y salida, potencia, rendimiento, y cantidades de energía fotovoltaica producidas. También permite comandar el convertidor, seleccionar el tipo de algoritmo MPPT, monitorizar eventos y alarmas, y configurar el perfil de carga y las características de la batería cuando opera en modo cargador. Ofrece además otras funcionalidades más avanzadas como *datalogging* y conexión a internet.



Figura 13. Módulo accesorio RCC-02 de Studer Innotec.

El módulo RCC-02 dispone de una interfaz de comunicación serie sobre TCP/IP que emplea el protocolo propietario *Xtender Serial* de Studer Innotec, cuya especificación [25] es proporcionada públicamente en la página web del fabricante. Mediante esta interfaz, el módulo RCC-02 puede comunicarse con uno o varios convertidores VarioString en paralelo, o con otros dispositivos a un nivel de control superior para la monitorización y comando remotos de los convertidores.

Para implementar la comunicación entre el módulo RCC-02 y el FLC, a fin de conseguir monitorizar y comandar de manera remota el dispositivo VarioString VS-70, ha sido necesario añadir un módulo Xcom-CAN (Figura 14), que es una pasarela TCP/IP - CAN 2.0B específica para el protocolo *Xtender Serial*, también proporcionada por Studer Innotec. La implementación del protocolo *Xtender Serial* sobre el bus CAN 2.0B [26] también es proporcionada públicamente por el fabricante en su página web.



Figura 14. Módulo Xcom-CAN de Studer Innotec.

En la Figura 15 se muestra la conexión de los cables de comunicación entre el dispositivo VarioString VS-70, el módulo RCC-02 y la pasarela Xcom-CAN. En el apartado 7.1.7 del Anexo II, se indican cuáles son las tramas de *Xtender Serial* que se emplean para la monitorización y comando del dispositivo VarioString VS-70 desde el FLC, y cómo se realiza su empaquetamiento en la trama CAN 2.0B.

En la Tabla 2, se indican las características del cargador solar Studer Innotec VarioString VS-70.

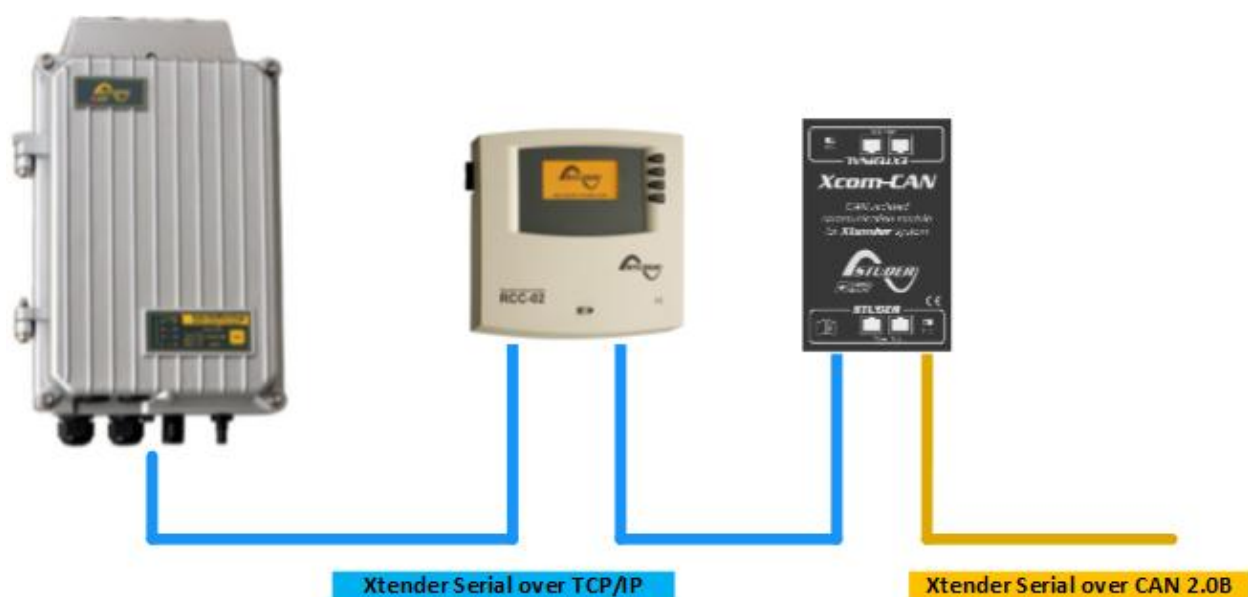


Figura 15. Comunicación entre el cargador solar VarioString VS-70, el módulo remoto de control RCC-02 y el módulo de comunicación Xcom-CAN.

Tabla 2. Características técnicas cargador solar VarioString VS-70 de Studer Innotec.

Características VarioString VS-70	
Características eléctricas lado módulos FV	
Potencia solar máx. recomendada	4200 W
Intensidad máxima	13 A
Tensión máxima de circuito abierto (V_{oc})	600 V
Tensión mínima de funcionamiento	200 V
Tensión MPP recomendada	250 - 500 V
Características eléctricas lado baterías	
Intensidad máxima de salida	70 A
Tensión nominal de batería	48 V
Rango de tensión de funcionamiento	38 - 68 V
Prestaciones del equipo	
Eficiencia de conversión máxima	> 98 %
Eficiencia MPPT	> 99.8 %
Autoconsumo en <i>Standby</i> (noche)	< 20 mA (1 W)
Etapas de carga	4 etapas (<i>bulk</i> , absorción, flotación, ecualización).
Valor de compensación por temperatura de batería (BTS-01)	-3 mV / °C / célula de fábrica ajustable -8 to 0 mV / °C
Protecciones electrónicas	
Inversión de polaridad lado FV	-
Sobretensión	-
Corriente inversa de noche	-
Aislamiento galvánico	-
Posibilidad de puesta a tierra FV	FV+, FV-, ninguna
Protección de puesta a tierra	Programable
Entorno	
Rango temperatura de funcionamiento	-20 a 55 °C
Humedad	100 %
Índice de protección IP	IP54
Lugar de montaje	Interior

2.10.3 Stack de baterías de plomo-ácido Classic Solar Enersol T 370 de Exide

El stack de baterías de plomo ácido (Figura 16) constituye una unidad de almacenamiento secundaria, destinada fundamentalmente a estabilizar el bus principal de la Microrred, atenuando los regímenes transitorios del balance de potencias que se producen ante cambios en la generación o en la demanda. Por otro lado, también es el elemento que establece la tensión en el bus principal, ya que está conectado al mismo directamente, sin ninguna etapa de conversión intermedia.



Figura 16. Stack de baterías de plomo-ácido

El stack está integrado por 24 celdas o monobloques modelo Classic Solar Enersol T-370 del fabricante Exide Technologies, diseñados específicamente para instalaciones fotovoltaicas de autoconsumo, y cuyas características son las que se muestran en la Tabla 3. Las 24 celdas están conectadas en serie, con lo cual el stack proporciona una tensión nominal de 48 V, y una capacidad nominal total de 9024 Ah / 18.048 kWh.

Tabla 3. Características de la celda de plomo-ácido Classic Solar Enersol T-370 de Exide Technologies

Características celda Classic Solar Enersol T-370	
Tensión Nominal	2.00 V
Capacidad Nominal C120 1.85 Vpc 25°C	376 Ah / 0.752 kWh
Resistencia Interna	0.70 mΩ
Intensidad de Cortocircuito	2900 A

Tabla 4. Características del stack de baterías de plomo-ácido

Características stack baterías plomo-ácido	
Tensión Nominal	48.00 V
Capacidad Nominal C120 1.85 Vpc 25°C	9024 Ah / 18.048 kWh
Resistencia Interna	16.80 mΩ

2.10.4 Stack de baterías de litio GBS LFP 100Ah con BMS Elite Power

El stack de baterías de litio constituye, junto con el tanque de hidruros metálicos, uno de los sistemas de almacenamiento de energía de la Microrred. Está integrado por 16 celdas LFP de 100 Ah del fabricante Global Battery Solutions (Figura 17), diseñadas específicamente para instalaciones fotovoltaicas.



Figura 17. Stack de baterías de litio GBS LFP 100Ah.

Las 16 celdas están conectadas en 4 arrays paralelos de 4 celdas cada uno. Como la tensión nominal de una celda es de 4 V, y su capacidad 1.2 kWh, entonces la tensión nominal y la capacidad total del stack son 48 V y 19.2 kWh respectivamente.

Cada celda dispone de su propio BMS o *Sense Board* (Figura 18). Las *Sense Boards* se comunican entre ellas mediante el protocolo CAN. Además de medir la tensión y la temperatura, y también estimar el SOC, de su celda correspondiente, también realizan de forma coordinada el balanceo del stack completo.



Figura 18. *Sense Board*.

Para la monitorización desde un nivel de control superior de las medidas de tensión y temperatura, así como de las estimaciones del SOC, de todas las *Sense Boards* del stack, se dispone de un módulo adicional EMS (*Energy Management System*) del fabricante Elite Power Solutions (Figura 19). Este dispositivo permite también monitorizar avisos de alarma y de *warning* por superación de límites de temperatura en cada celda, por superación de límites de tensión o de intensidad del stack, o fallos ocasionados por *Sense Boards* que dejen de funcionar o por derivaciones en el chasis sobre el que está montado el stack.



Figura 19. Módulo EMS de Elite Power Solutions.

Para la comunicación con el FLC, el módulo EMS emplea un protocolo propietario sobre CAN 2.0A de Elite Power Solutions, denominado *Broadcaster V3.1* [22]. En el apartado 7.1.6 del Anexo II, se indican las características de la interfaz CAN del módulo EMS, y también cómo se realiza el empaquetamiento del protocolo Broadcaster V3.1 en la trama CAN.

En la Tabla 5, se indican las características técnicas de la celda GBS LFS 100 Ah.

Tabla 5. Características técnicas de la celda GBS LFS 100 Ah.

Características Celda GBS LFS 100 Ah	
Type of Cell	Lithium iron phosphate (LiFePO ₄)
Rated capacity	100 Ah / 1.2 kWh
Discharge capacity	0.2 C
Internal impedance	$\leq 2.8 \text{ m}\Omega$
Nominal voltage	4 V
Cycle life	2000 cycles 80% DOD
Operating temperature charging	0 - 65 °C
Operating temperature discharging	-20 - 65°C
Storage temperature	-20 - 65 °C

2.10.5 Convertidor DC/DC GEP-AICIA ESS3 para Stack de Baterías de Litio

Para adaptar la tensión del stack de baterías de litio a la tensión del bus principal de la Microrred se emplea un convertidor DC/DC bidireccional elevador-reductor de 3 kW, diseñado y construido por el Grupo de Electrónica de Potencia de AICIA específicamente para esta aplicación, dentro del contexto del proyecto CONFIGURA. El equipo se ha denominado ESS3-DCDC (Figura 20).



Figura 20. Convertidor ESS2-DCDC.

Este convertidor puede proporcionar una potencia máxima de 3 kW, y trabajar a tensiones e intensidades de hasta 56 V y 62.5 A respectivamente, tanto en el bus conectado al stack de baterías como en el bus conectado al bus principal de la Microrred. Ofrece un rendimiento máximo a la potencia nominal del 95 %.

El convertidor sólo puede trabajar de manera remota. Para ello, dispone de una interfaz Modbus TCP/IP mediante la cual pueden enviarse al convertidor órdenes de marcha, parada y rearme, el *setpoint* de potencia, y monitorizar tensiones e intensidades de los buses y de los condensadores DC-Link, temperaturas de IGBTs y de las bobinas de filtrado de armónicos, así como los *flags* de estados de funcionamiento y alarmas. En el apartado 7.1.2 del Anexo II, se especifican las características y el mapa de registros de la interfaz Modbus del convertidor ESS3-DCDC, extraídos de la documentación técnica suministrada por el GEP de AICIA [12].

2.10.6 Electrolizador Acta Heliocentris EL500

Para la producción de hidrógeno, la Microrred dispone de un electrolizador Acta Heliocentris EL500 (Figura 21). Este equipo dispone de dos stacks AES500 (Figura 22), que emplean membranas de intercambio aniónico, y que ofrecen en conjunto una capacidad de producción de hasta 510 NI/h de hidrógeno, con un consumo máximo de potencia de 2.9 kW.



Figura 21. Electrolizador Acta Heliocentris EL500.



Figura 22. Stack AES500 de Acta-Heliocentris.

La membrana de intercambio aniónico está fabricada con polímero sólido, y proporciona al stack una barrera física que impide la mezcla del hidrógeno con el oxígeno durante la electrólisis. Esto, unido a la presurización de los stacks a presiones por encima de los 30 bares, mantiene los ratios de H_2/O_2 en el ánodo y en el cátodo muy por debajo de sus límites de inflamabilidad. Según el fabricante, estos stacks ofrecen un nivel de seguridad suficiente como para ser utilizados en aplicaciones industriales y domésticas, más allá del ámbito experimental.

Los stacks AES500 son capaces de producir hidrógeno con una pureza de hasta el 99.94 % a una presión de 30 bares. Para ello, es necesario el uso de agua desmineralizada. Para aplicaciones especiales, se dispone de un módulo adicional de purificación y secado, que permite conseguir un mayor nivel de pureza, de hasta un 99.999 %, y cuyo montaje en el equipo es opcional. En el caso del equipo empleado en la Microrred, se dispone de dicho módulo, debido a que el posterior uso del hidrógeno producido para alimentar la pila de hidrógeno requiere el máximo nivel de pureza.

El electrolizador EL500 dispone también de un depósito propio para almacenar el agua desmineralizada para electrólisis, y de un buffer a la salida de los stacks para absorber los transitorios de presión que puedan producirse en la red externa en la cual se inyecta el hidrógeno generado.

El electrolizador EL500 puede operar en **Modo Local** o en **Modo Remoto**. Para la operación en modo local, dispone de una interfaz propia, integrada por una única pantalla LCD táctil, mediante la cual el usuario puede monitorizar el estado de operación del electrolizador, el caudal de hidrógeno producido, la presión en los stacks y las alarmas activas, y también solicitar el arranque, la parada o el rearme del equipo.

Para la operación en modo remoto, el equipo dispone de dos interfaces Modbus, una sobre RS-485 y la otra sobre TCP/IP. A través de la interfaz Modbus, pueden monitorizarse los estados de funcionamiento del electrolizador y del módulo de purificación y secado, los flags de errores, y todo el conjunto de magnitudes medidas por la instrumentación del equipo como las tensiones, intensidades y presiones en los stacks, el caudal de hidrógeno producido, la presión en el buffer de salida, la temperatura en el tanque de agua o la presión y la temperatura en el módulo de purificación y secado. También, a través de la interfaz Modbus, pueden enviarse los comandos de marcha, parada y rearme, así como un setpoint en formato porcentual para el caudal de hidrógeno producido. En el apartado 7.1.3 del Anexo II, se especifican las características y el mapa de registros de la interfaz Modbus.

Adicionalmente, para ofrecer una mayor fiabilidad, el electrolizador dispone de una entrada analógica adicional, de 0 a 10 V, para ajustar el setpoint del caudal de hidrógeno producido.

Para una producción de hidrógeno a máximo caudal, el electrolizador ELS500 puede consumir una potencia de hasta 2.9 kW. Se tiene también un caudal de producción mínimo, que es de un 21% sobre el máximo caudal, en el cual el electrolizador puede consumir una potencia de hasta 1.2 kW.

El electrolizador se alimenta directamente del bus principal de la Microrred. Para ello, dispone de un convertidor DC/DC propio que adapta las tensiones del bus a las tensiones de los stacks y de la instrumentación de control del equipo.

En la Tabla 6, se muestran las características técnicas del electrolizador EL500.

Tabla 6. Características técnicas del electrolizador Acta Heliocentris EL500.

Características Electrolizador Acta Heliocentris EL500	
Máx hydrogen flow rate at 20 °C/1 bar	510 NI/h
Hydrogen max outlet pressure	35 bar
Hydrogen purity	99.999 % at 30 bar (with Dryer Module)
Operative power consumption	2300 W
Max power consumption	2900 W
Voltage supply	230 Vac / 50 Hz
Power factor	0.98
Operating temperature	45 °C
Ambient temperature	15 °C - 45 °C
Ambient relative humidity	20 - 95 % non-condensing
Storage temperature	Min. 2 °C
Demineralized water max conductivity (at 25 °C)	10 μ S/cm
Max water consumption	0.40 l/h
Cabinet index of protection	IP54

2.10.7 Pila de Hidrógeno Acta Heliocentris NEXA 1200

Para la generación de potencia eléctrica a partir del hidrógeno, la Microrred dispone de una pila de combustible Nexa 1200 de Heliocentris (Figura 23). Este equipo emplea un stack modelo FCgen-1020ACS de Ballard Power Systems (Figura 24), con capacidad para generar hasta 1200 W, a tensiones de entre 16 y 40 V y a una intensidad máxima de 60 A, con un consumo de hidrógeno de 15 NI/minuto.



Figura 23. Equipo Heliocentris Nexa 1200.



Figura 24. Stack FCgen-1020ACS de Ballard Power Systems.

El stack está integrado por 36 celdas tipo PEM (Proton Exchange Membrane). Emplea una tecnología de cátodo abierto, y dispone de un sistema de autohumidificación para los electrodos.

El equipo NEXA 1200 puede operar en **Modo Local** o en **Modo Remoto**. Para la operación en modo local, dispone de una interfaz muy simple integrada por tres indicadores luminosos, para monitorizar los estados de *standby*, *starting*, *running* y *error*, y un pulsador para las órdenes de marcha, parada y rearme.

Para la operación en modo remoto, el equipo dispone de una interfaz CAN 2.0A, a través de la cual pueden monitorizarse su estado de operación, los flags de warning y de error, y las medidas de magnitudes como la tensión y la intensidad del stack, o la presión del hidrógeno en el punto de conexión con la red que lo alimenta. A través de esta interfaz, también pueden enviarse comandos de marcha, parada y rearme al equipo. En el apartado 7.1.5 del Anexo II, se especifican las características y el mapa de tramas de la interfaz CAN del equipo NEXA 1200.

El stack FCgen-1020ACS del equipo NEXA 1200 presenta la curva de polarización que se muestra en la Figura 25, extraída de [39]. Para adaptar las tensiones e intensidades generadas por el stack a la tensión del bus principal de la Microrred, se dispone de un convertidor DC/DC de 3 kW, que se describe en el apartado siguiente. El equipo NEXA 1200 no recibe consignas de potencia; en lugar de ello, dispone de un sistema de control que regula el consumo de hidrógeno y la potencia generada según la curva de polarización del stack, adaptándose a la demanda del convertidor DC/DC, que es el equipo que recibe el setpoint de potencia a inyectar en el bus principal.

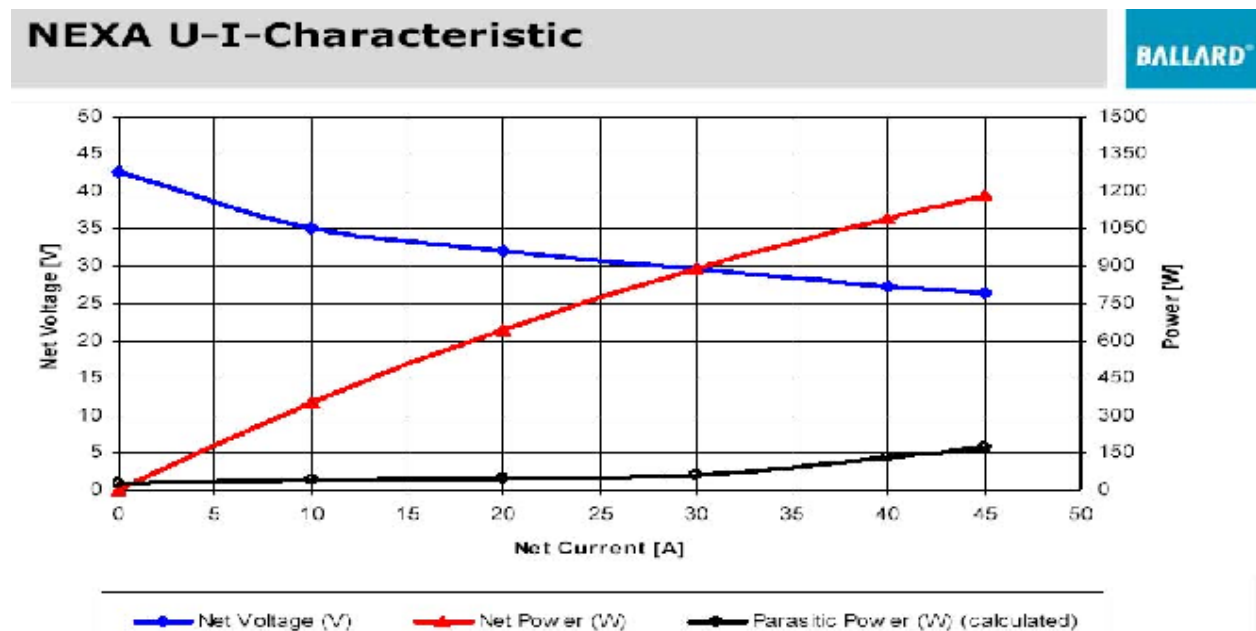


Figura 25. Curva característica del stack FCgen-1020ACS de Ballard Power Systems.

En la Tabla 7, se indican las características técnicas del stack FCgen-1020ACS de Ballard Power Systems, y en la Tabla 8 las del equipo Nexa 1200 de Heliocentris.

Tabla 7. Características técnicas del stack FCgen-1020ACS de Ballard Power Systems.

FCgen-1020ACS Technical Specifications	
Type	PEM (Proton Exchange Membrane) fuel cell stack
Typical Performance	
Rated Power	43 W/cell
Minimum	65 Amps
DC Voltage	660 mV/cell
Fuel	
Hydrogen purity	99.95 % or better
Fuel supply pressure	0.16 to 0.56 barg
Fuel flow rate	~0.5 slpm/cell
Oxidant / Coolant	
Coolant	Air
Coolant flow rate	~50 slpm/cell
Temperatures	
Operating temperature	-40 °C to 52 °C
Start up temperature	≥ -10 °C to 52 °C

Tabla 8. Características técnicas del equipo Heliocentris Nexa 1200.

Nexa 1200 Technical Specifications	
Power Output	
Output voltage	16 ... 40 Vdc
Rated current	60 Adc max
Rated output	1200 W at 5...25°C
	1000 W at 35 °C
Fuel	
Hydrogen minimum purity	99.99 % or better
Permissible inlet pressure	1 ... 15 bar
Hydrogen consumption at 1200 W	15 Nl/min
Electrical supply	
Minimum input power	110 Wdc
Power supply	12 ... 36 Vdc
Oxidant	
Oxygen	Atmospheric oxygen
Volume flow rate	Max 335 m³/h
Oxygen concentration	Min 18 %
Ambient pressure	700 ... 1100 mbar
Temperature	5 ... 35 °C
Vaporous water content in exhaust gas at rated output	550 g/h
Operating environment	
Operating location	Inside of labs, dry
Ambient temperature	5 ... 35 °C
Relative humidity	0 ... 95 % non-condensing

2.10.8 Convertidor DC/DC Win Inertia 3kW para Pila de Hidrógeno

Para adaptar la tensión de salida de la pila de hidrógeno a la tensión del bus principal de la Microrred se emplea un convertidor DC/DC de 3 kW, desarrollado ex-professo para esta instalación por Wind Inertia Technologies S.L. (Figura 26).

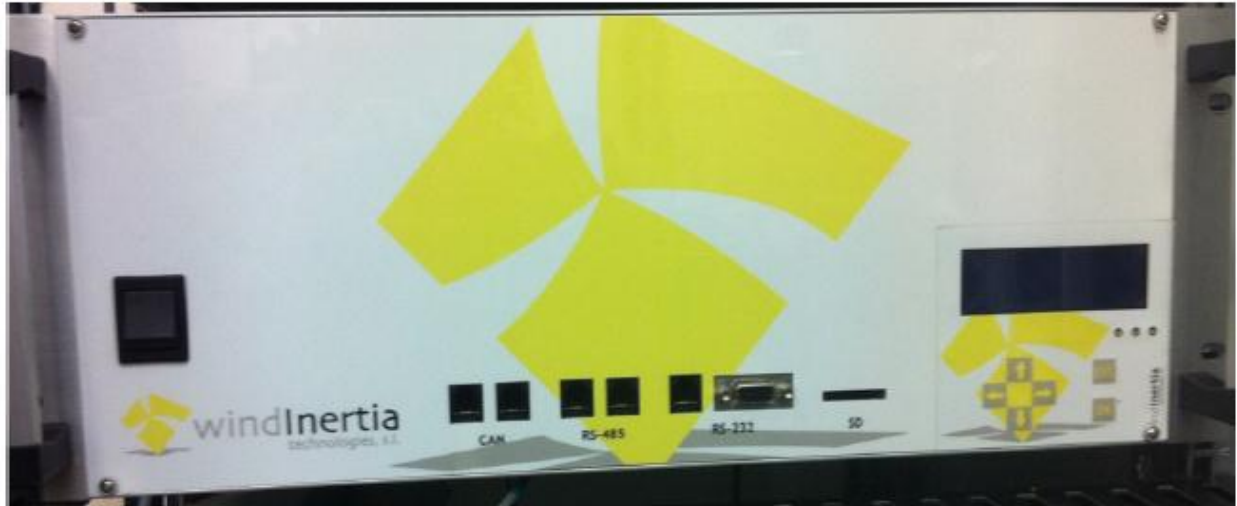


Figura 26. Convertidor DC/DC de 3 kW de Wind Inertia Technologies S.L.

Este convertidor DC/DC puede proporcionar una potencia máxima de 3 kW, y trabajar a tensiones e intensidades de hasta 75 V y 40 A respectivamente, tanto en el bus de entrada como en el bus de salida.

Ofrece dos modos de regulación diferentes:

- **Modo Potencia Constante.** En este modo de regulación, la potencia en el bus del convertidor conectado al bus principal de la Microrred se mantiene constante, de acuerdo con el setpoint establecido por el usuario, a despecho de las tensiones e intensidades a la entrada y a la salida del convertidor.
- **Modo Intensidad Constante.** En este modo de regulación, la intensidad en el bus del convertidor conectado al bus principal de la Microrred se mantiene constante, de acuerdo con el setpoint establecido por el usuario, a despecho de las tensiones y potencias a la entrada y a la salida del convertidor.

El convertidor puede trabajar en **Modo Local** o en **Modo Remoto**. Para la operación en Modo Local, dispone de una interfaz propia, provista de un display LCD y una botonera, mediante la cual el usuario puede enviar comandos de arranque, parada o rearme, seleccionar el modo de regulación, e introducir valores de setpoint.

Para la operación en Modo Remoto, el convertidor dispone de una interfaz CAN, cuyas características y mapa de tramas son las que aparecen especificadas en el apartado 7.1.4 del Anexo II.

2.10.9 Fuente de alimentación programable DC Powerbox LBS 60-100

La fuente de alimentación programable DC se emplea para emular los perfiles de generación fotovoltaica y eólica ejecutados desde el Segundo Nivel de Control de la planta, y también la compra de energía a la red eléctrica para cubrir la demanda no satisfecha. Es el modelo LBS 60-100 del fabricante Powerbox (Figura 27).



Figura 27. Fuente de alimentación programable DC Powerbox LBS 60-100.

La fuente de alimentación LBS 60-100 puede proporcionar una potencia de hasta 6 kW, y trabajar a tensiones e intensidades de hasta 60 V y 100 A respectivamente.

Ofrece tres modos de regulación diferentes:

- **Modo Tensión Constante (CV, *Constant Voltage*).** En este modo de regulación, la tensión a la salida de la fuente se mantiene constante, de acuerdo con el setpoint establecido por el usuario, mientras la intensidad y la potencia varían con la carga. La fuente opera en este modo de regulación siempre que la intensidad se mantenga por debajo de cierto límite preestablecido por el usuario.
- **Modo Intensidad Constante (CC, *Constant Current*).** En este modo de regulación, la intensidad a la salida de la fuente se mantiene constante, de acuerdo con el setpoint establecido por el usuario, mientras la tensión y la potencia varían con la carga. La fuente opera en este modo de regulación siempre que la impedancia de la carga sea lo suficientemente baja como para permitir que la intensidad de salida se mantenga en el valor de setpoint.
- **Modo Potencia Constante (CP, *Constant Power*).** En este modo de regulación, la potencia a la salida de la fuente se mantiene constante, de acuerdo con el setpoint establecido por el usuario, mientras la tensión y la intensidad varían con la carga. La fuente opera en este modo de regulación siempre que la potencia entregada a la carga no supere cierto valor límite preestablecido por el usuario.

La fuente de alimentación programable puede trabajar en **Modo Local** o en **Modo Remoto**. Para la operación en Modo Local, dispone de una interfaz propia, provista de un display LCD y una botonera, mediante la cual el usuario puede seleccionar el modo de regulación, el escalado, e introducir valores de setpoint o valores límite.

Para la operación en Modo Remoto, la fuente de alimentación programable dispone de una interfaz analógica con dos salidas analógicas de 0 a 10 V, para la monitorización de la tensión y la intensidad de salida, y dos entradas analógicas para ajustar valores límite o de setpoint dependiendo del modo de regulación seleccionado. Por ejemplo, para el modo de regulación CV, una de las entradas analógicas se utilizaría para ajustar el valor del límite de tensión, y la segunda entrada analógica para ajustar el valor del setpoint de intensidad.

En la Tabla 9 y Tabla 10, se indican las principales características de la fuente de alimentación DC programable.

En el apartado 7.3.6 del Anexo III, se especifican los parámetros para el escalado de las medidas y *setpoints* de tensión e intensidad de la fuente de alimentación programable utilizados en el FLC.

Tabla 9. Características técnicas de la fuente de alimentación programable DC Powerbox LBS 60-100. Parte 1.

Output Performance Specifications	
Rated Output Range	
Voltage	0 - 60 V
Current	0 - 100 W
Max Output Power	6 kW
Efficiency	
Typical	89% efficiency at nominal line voltage and ambient temperature.
Minimum	82% efficiency. Specific minimum efficiency limits are model dependent.
Display Specifications	
CV Resolution	1/16000 of Rated Voltage
CV Accuracy (CVH, CVM, CVL)	0.05% +/- (0.1% x V) V
Load Regulation	
Voltage	5 mV + 0.05% of Vmax
Current	20 mA + 0.1% of Imax
Power	1% of Pmax
Line Regulation	
Voltage	0.01% of Vmax
Current	0.05% of Imax
Power	1% of Pmax
Programming Range for Voltage, Current, and Power	
Voltage and Current	From 0-103% of the rated maximum output
Power	From 0-103% of the rated maximum output
Typical Programming Resolution - Front Panel or Remote Digital Interface	
Voltage	0.002% of Vmax
Current	0.002% of Imax
Power	0.05% of Pmax
Over Voltage Protection	0.002% of Vmax
Typical Programming Resolution - Remote Analog Programming Interface	
Voltage	0.002% of Vmax
Current	0.002% of Imax
Typical Measurement Resolution - Front Panel or Remote Digital Interface	
Voltage	0.002% of Vmax
Current	0.002% of Imax
Power	0.05% of Pmax
Typical Measurement Resolution - Remote Analog Programming Interface	
Voltage	0.002% of Vmax
Current	0.002% of Imax
Programming Accuracy - Front Panel or Remote Digital Interface	
Voltage Programming	0.1% of Vmax
Current Programming	0.5% of Imax
Power Programming	0.5% of Pmax
Over voltage Programming	0.1% of Vmax
Programming Accuracy - Remote Analog Programming Interface	
Voltage Programming	0.2% of Vmax
Current Programming	0.5% of Imax

Tabla 10. Características técnicas de la fuente de alimentación programable DC Powerbox LBS 60-100.
(Parte 1).

Output Performance Specifications	
Readback Accuracy - Front Panel or Remote Digital Interface	
Voltage Readback	0.15% of Vmax
Current Readback	0.5% of Imax
Power Readback	0.5% of Pmax
Remote Analog Programming Interface	
Voltage Readback	0.3% of Vmax
Current Readback	0.5% of Imax
30 Minute Drift	
Voltage	0.04% of Vmax
Current	0.6% of Imax
Power	1% of Pmax
8 Hour Drift Temperature Stability	
Voltage	0.02% of Vmax
Current	0.04% of Imax
Power	0.1% of Pmax
Temperature Coefficients - Front Panel or Remote Digital Interface	
Voltage Programming	0.04% of Vmax/°C
Current Programming	0.06% of Imax/°C
Power Programming	0.1% of Pmax/°C
Voltage Readback	0.04% of Vmax/°C
Current Readback	0.06% of Imax/°C
Power Readback	0.1% of Pmax/°C
Temperature Coefficients - Remote Analog Programming Interface	
Voltage Programming	0.04% of Vmax/°C
Current Programming	0.06% of Imax/°C
Voltage Readback	0.04% of Vmax/°C
Current Readback	0.06% of Imax/°C
Analog Programming Interface	
Programming Lines Impedance	0-5 Vdc range > 30 kΩ
	0-10 Vdc range > 30 kΩ
Readback Lines Impedance	0-5 Vdc range < 500 Ω
	0-10 Vdc range < 1 kΩ
Isolation	58 Vdc with respect to chassis potential
Switching Frequency	
Typical	31 kHz / 62 kHz output ripple
Rise Time for a 5% to 95% step in output voltage	
No load	100 ms
Full load	100 ms
Fall Time for a 95% to 5% step in output voltage	
No load	3 s
Full load	50 ms

2.10.10 Carga electrónica programable DC Amrel PLA 2.5K-60-1000

La carga electrónica programable DC se emplea para emular tanto la inyección del exceso de potencia en la red eléctrica como los perfiles de demanda de potencia ejecutados desde el SLC. Es el modelo AMETEK PLA 2.5K-60-1000 del fabricante Amrel (Figura 28).



Figura 28. Carga electrónica programable DC Amrel AMETEK PLA 2.5K-60-1000.

La carga electrónica programable AMETEK PLA 2.5K-60-1000 puede absorber una potencia de hasta 2.5 kW, y trabajar a tensiones e intensidades de hasta 60 V y 1000 A respectivamente. Dispone de un generador de transitorios interno para emular operaciones dinámicas, que admite hasta 32 perfiles programables distintos.

Ofrece cuatro modos de operación diferentes:

- **Modo Intensidad Constante (CC, *Constant Current*).** En este modo de operación, la carga absorberá un valor de intensidad constante de acuerdo con el *setpoint* establecido por el usuario, a despecho de la tensión a la entrada.
- **Modo Tensión Constante (CV, *Constant Voltage*).** En este modo de operación, la carga intentará absorber la intensidad que sea necesaria para mantener su tensión de entrada a un valor constante de acuerdo con el *setpoint* establecido por el usuario.
- **Modo Resistencia Constante (CR, *Constant Resistance*).** En este modo de operación, la carga absorberá una intensidad linealmente proporcional a la tensión de entrada, de acuerdo con un valor de resistencia establecido por el usuario.
- **Modo Potencia Constante (CP, *Constant Power*).** En este modo de operación, la carga absorberá una cantidad de potencia constante de acuerdo con el *setpoint* establecido por el usuario, a despecho de la tensión y la intensidad de entrada.

La carga electrónica programable puede trabajar en **Modo Local** o en **Modo Remoto**. Para la operación en Modo Local, dispone de una interfaz propia, provista de displays LCD y botonerías, mediante la cual el usuario puede seleccionar el modo de operación, el escalado, introducir valores de *setpoint* o programar perfiles de tensión, de intensidad o de potencia transitorios.

Para la operación en Modo Remoto, la carga electrónica programable dispone de una interfaz SCPI por RS-232, y de una interfaz analógica con señales de 0 a 10 V. En el Apartado 4 del Manual de Operación del equipo [35], se especifican el lenguaje, la estructura y el juego de comandos que pueden emplearse con la interfaz SCPI. La interfaz analógica dispone de dos salidas analógicas de 0 a 10 V, para monitorizar la tensión y la intensidad de entrada, y de una entrada analógica, también de 0 a 10 V, para el envío de consignas al dispositivo, dentro del modo de operación seleccionado y para una determinada escala.

Para la monitorización y el comando de la carga electrónica programable desde el PLC de la Microrred, se emplea sólo la interfaz analógica. En la Figura 29, se muestra su cableado, extraído de [35].

En la Tabla 11, se indican las principales características de la carga electrónica programable.

En el apartado 7.3.7 del Anexo III, se especifican los parámetros para el escalado de las medidas de tensión e intensidad y del *setpoint* de potencia de la carga electrónica programable utilizados en el PLC.

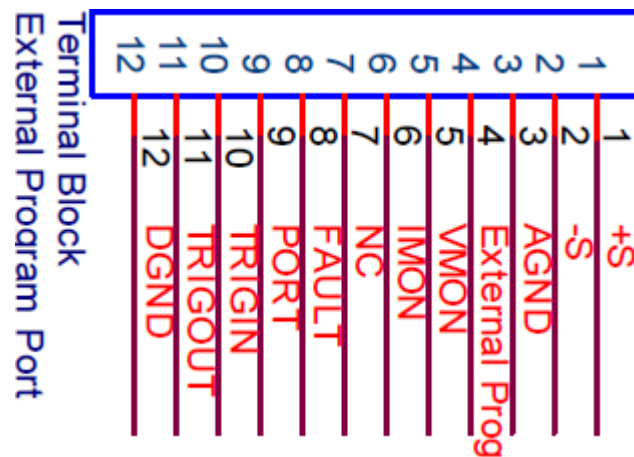


Figura 29. Cableado de la interfaz analógica de la carga electrónica programable AMETEK PLA 2.5K-60-1000.

Tabla 11. Características técnicas de la carga electrónica programable AMETEK PLA 2.5K-60-1000.

Constant Voltage Mode	
CV High Range	(0-V) V
CV Medium Range	0 - (V/2) V
CV Low Range	0 - (V/10) V
Temp Coefficient	100 ppm/°C of Rated Voltage
Transient Time Range	
Fast Band (default, Osc1)	0.500 - 51.19 ms
Slow Band (Osc2, Osc3)	0.500 ~ 511.9 ms
CV Resolutions*2	1/16000 of rated voltage
CV Accuracy*2 (CVH, CVM, CVL)	0.05% +/- (0.1% x Vmax) V
Display Specifications	
CV Resolution	1/16000 of Rated Voltage
CV Accuracy (CVH, CVM, CVL)	0.05% +/- (0.1% x V) V
Constant Power Mode	
CP High Range	(0-P) W
CP Medium Range	0 - (P/2) W @ DC input current \leq (I/2) A
CP Low Range	0 - (P/10) W @ DC input current \leq (I/10) A
Transient Time Range	Same as CC Mode
Temperature Coefficient	300 ppm/°C of Rated Power
Constant Power Mode: Program	
CP High Accuracy*2	1.00% +/- (Px0.5%) W @ input current > (I/20) A, input voltage > (V/10) V
CP Medium Range	1.00% +/- (Px0.5%) W @ input current > (I/100) A, input voltage > (V/10) V
CP Low Range	1.00% +/- (Px0.5%) W @ input current > (I/1000) A, input voltage > (V/5) V
Program	CP Resolution*2 1/16000 of Rated Power
Constant Current Mode	
CC High Range	0 - 1 A
CC Medium Range	0 - (I/2) A
CC Low Range	0 - (I/10) A
Transient Time Range	
Fast Band (default, Osc1)	0.050 - 51.19 ms
Slow Band (Osc2, Osc3)	0.500 - 511.9 ms
Temperature Coefficient	100 ppm /°C of Rated Current
Constant Current Mode: Program	
CC Resolution*2	1/16000 of rated current
CC High Accuracy*2 LHM	0.05% +/- (Ix0.1%) A
Constant Resistance Mode	
Transient Time Range: CRM / CRH	Same As CC Mode
Transient Time: CRL	Same as CV Mode
Temperature Coefficient: CRM/H	300 ppm/°C of Minimum Resistance
Temperature Coefficient: CRL	300 ppm/°C of Maximum Resistance
Constant Resistance Mode: Program	
CR Resolution*2	1/16000 of rated value
External Programming Mode	
Monitor Output Signal	0-10 Volts output for 0 to full scale value.
VMON Accuracy	0.10% +/- (Vx0.1%) V
IMON Accuracy	0.10% +/- (Ix0.1%) A
Analog Program	0 ~ 10 Volts Input yields 0 -- selected full scale loading in all modes
Accuracy	Same As Internal \pm 0.1% Rating
Input Impedance	200 k Ω \pm 1%
BandWidth (-3dB)	Limited by internal transient time.
Remote Interface	GPIB / RS-232 / Ethernet / USB

2.10.11 Tanques de hidruros metálicos HBond 7000H para almacenamiento de hidrógeno

Para el almacenamiento del hidrógeno se emplean dos tanques de hidruros metálicos modelo HBond-7000H del fabricante LabTech Int LTD.

Estos tanques de hidruros contienen una aleación de metales en forma de polvo que, al ser sometida a una atmósfera de hidrógeno a cierta presión, es capaz de absorber el hidrógeno, en un proceso exotérmico que se produce a baja temperatura. Los átomos de hidrógeno quedan alojados en los huecos intersticiales de la matriz metálica de la aleación, resultando de ello la formación de un hidruro metálico. Si este hidruro metálico es sometido a una alta temperatura, entonces el hidrógeno es desorbido en un proceso endotérmico, obteniéndose nuevamente la aleación metálica original.

Los ciclos de carga y descarga de hidrógeno en un tanque de hidruros generan defectos permanentes en la estructura cristalina de la aleación metálica, mermando su capacidad de absorción y ocasionando, por tanto, una degradación progresiva en la capacidad de almacenamiento del tanque, limitando su vida útil a una cierta cantidad de ciclos.



Figura 30. Tanque de hidruros metálicos HBond-7000H. Imagen extraída de [34].

En concreto, los tanques empleados en la Microrred del HyLab contienen una aleación de LaCeNi_5 , denominada de tipo AB5, que proporciona una densidad energética de 1850 kJ por Kg. Cada tanque tiene una capacidad de 7 Nm³, o 7000 NI. La absorción del hidrógeno en el tanque se realiza a una presión de carga de 5 bares, a una temperatura máxima de 25°C. Por otro lado, la desorción del hidrógeno se realiza a temperaturas de 65 °C hasta 75 °C, a presiones de descarga de 2 a 5 bares. El hidrógeno desorbido es suministrado con una pureza elevada, superior al 99.9%.

Cada tanque dispone de un circuito hidráulico interno, mediante el cual puede inyectarse agua fría para evacuar el calor generado durante la carga del hidrógeno y mantener la temperatura de absorción por debajo de su límite máximo, o inyectar agua caliente para realizar la descarga del hidrógeno.

Teniendo en cuenta que cada tanque contiene 46 Kg de aleación LaCeNi_5 , y que la densidad energética de esta aleación es de 1850 kJ por Kg, la cantidad de energía que pueden almacenar los dos tanques es de 47.28 kWh.

Por otro lado, teniendo en cuenta que cada tanque puede almacenar 7000 NI de hidrógeno, y que el consumo de la pila de hidrógeno es de aproximadamente 12 NI/minuto cuando está entregando una potencia de 1 kW al bus principal de la Microrred, entonces los dos tanques permitirían hacer funcionar la pila de hidrógeno a su potencia máxima durante 19.44 horas.

En la Tabla 62, se indican las principales características del tanque de hidruros metálicos HBond-7000H de Labtech.

Tabla 12. Características del tanque de hidruros metálicos HBond-7000H de Labtech

Características Tanque de Hidruros Metálicos Labtech HBond-7000H	
Capacidad de Almacenamiento H ₂	7000 NI
Presión de Carga	5 bares g
Temperatura Máxima de Carga	25 °C
Tiempo de Carga	45 - 60 minutos
Presión de Descarga	2 - 5 bares g
Temperatura de Descarga	65 - 75 °C

2.10.12 Circuito hidráulico para la inyección de agua fría o caliente en los tanques de hidruros

La Microrred del Hylab dispone de un circuito hidráulico, configurable mediante un conjunto de llaves de paso, mediante el cual se realiza la inyección de agua fría en los tanques de hidruros durante los procesos de carga de hidrógeno, para mantener la temperatura de absorción por debajo de su límite máximo, o la inyección de agua caliente para realizar la descarga del hidrógeno.

Para el aprovisionamiento de agua caliente se dispone de un calentador de agua doméstico, y de una bomba hidráulica que bombea el agua que sale de los tanques de hidruros hacia el calentador nuevamente. El agua fría se toma directamente de la red de suministro de la ETSI de Sevilla.

El circuito hidráulico dispone de dos termopares tipo T, uno de ellos instalado a la entrada de los tanques de hidruros, para medir la temperatura del agua inyectada, y el otro colocado a la salida, para medir la temperatura del agua que sale. A partir de la diferencia entre ambas temperaturas, puede cuantificarse la cantidad de energía que los tanques absorben o disipan durante los procesos de carga y descarga del hidrógeno.

Por último, el circuito hidráulico dispone también de un medidor de caudal, y de dos electroválvulas para permitir o cortar la inyección de agua en los tanques de hidruros.

Las electroválvulas del circuito hidráulico tienen las siguientes denominaciones:

- **FY05.** Electroválvula para la entrada de agua caliente en los tanques de hidruros.
- **FY06.** Electroválvula para la entrada de agua fría en los tanques de hidruros.

2.10.13 Circuito de hidrógeno

La Microrred del HyLab dispone de un circuito de hidrógeno, configurable mediante un conjunto de electroválvulas comandadas desde el PLC, que permite la conducción del hidrógeno generado por el electrolizador a los tanques de hidruros durante los procesos de carga, o la conducción del hidrógeno desorbido de los tanques hacia a pila de combustible para su alimentación. También permite alimentar la pila de combustible desde una bala de hidrógeno situada en el exterior del edificio.

El circuito de hidrógeno dispone de los siguientes instrumentos de medida:

- Un transductor de presión para medir la presión a la entrada de los tanques de hidruros.
- Un transductor de presión para medir la presión a la entrada de la pila de combustible.
- Un medidor de caudal másico de hidrógeno, para medir el caudal de hidrógeno consumido por la pila proveniente de la descarga de los tanques de hidruros.
- Un termopar tipo T, para medir la temperatura del hidrógeno a la salida de los tanques de hidruros.

El circuito de hidrógeno ha sido construido mediante conducciones de acero AISI 316, que es un tipo de acero que no se fragiliza con el hidrógeno, y que además es amagnético, para que no acumule cargas electrostáticas con la fricción del hidrógeno y evitar que se originen descargas eléctricas. Dispone de una toma para inertización con nitrógeno.

Las electroválvulas del circuito de hidrógeno tienen las siguientes denominaciones:

- **FY01.** Electroválvula H2 de electrolizador.
- **FY02.** Electroválvula H2 alimentación pila.
- **FY03.** Electroválvula H2 inertización de conducciones.
- **FY04.** Electroválvula H2 procedente de botellas.

2.11 Descripción de la arquitectura de control

La arquitectura de control de la Microrred del Hylab está estructurada en tres niveles. Se tiene un **Nivel de Control Cero**, que sería el más bajo de los tres, y que estaría integrado por el conjunto de controladores finales o **FCEs** (*Front End Controller*) de todos los equipos y sistemas de los que dispone la Microrred. Se tiene un nivel de control intermedio, denominado **Nivel de Control 1**, integrado por un único dispositivo físico, el **FLC** (*First Level Controller*), que se encarga, fundamentalmente, de gestionar los diferentes modos de operación de la Microrred, y que también sirve de nexo entre el Nivel de Control 0 y el tercer nivel de control. El tercer nivel de control, denominado **Nivel de Control 2**, también está integrado por un único dispositivo físico, el **SLC** (*Second Level Controller*), que se encarga principalmente de ejecutar algoritmos y estrategias de control para gestionar la generación y almacenamiento de energía de la Microrred.

En este contexto, se denomina FEC al sistema de control propio de un equipo, diseñado e integrado por el fabricante que lo desarrolló. Un FEC puede implementar algunas o la totalidad de las siguientes funcionalidades:

- **Control y regulación de magnitudes internas del equipo mediante determinados lazos o algoritmos de control programados en fábrica e inaccesibles para el usuario.**
- **Acondicionamiento y recopilación del conjunto de medidas de magnitudes, así como de indicaciones de estados y flags de eventos y errores, fallos y alarmas, para su lectura desde el siguiente nivel de control.**
- **Ejecución de una determinada secuencia de puesta en marcha del equipo cuando recibe una orden de marcha desde el siguiente nivel de control.**
- **Ejecución de una determinada secuencia de apagado del equipo cuando recibe una orden de apagado desde el siguiente nivel de control.**
- **Regulación de la generación o absorción de potencia u otra variable energética, en función de los valores de setpoint recibidos desde el siguiente nivel de control.**
- **Detección y notificación de condiciones de error o fallo.**
- **Puesta del equipo en un estado de operación seguro para su protección en caso de detección de error o fallo.**
- **Gestión de las transiciones entre secuencias y modos de funcionamiento mediante una determinada máquina de estados.**
- **Comunicación con el FLC, mediante interfaces digitales o analógicas, o mediante protocolo estándar/proprietario sobre bus de campo.**

Los equipos de la Microrred que disponen de FEC son los siguientes:

- **Convertidor DC/DC para el campo de paneles fotovoltaicos (CPH).**
- **Stack de baterías de litio (Li).** El FEC estaría integrado por el BMS y el conjunto de Sense Boards.
- **Convertidor DC/DC para el stack de baterías de litio (CLI).**
- **Electrolizador (EZ).**
- **Pila de Hidrógeno (FC).**
- **Convertidor DC/DC para la pila de hidrógeno (CFC).**
- **Fuente de alimentación DC programable (PS).**
- **Carga electrónica DC programable (DCL).**

El *First Level Controller* consiste en una plataforma de automatización de la serie M340 de Schneider, provista de una CPU BMX P34 20302, un módulo de entradas digitales DDI1602, un módulo de salidas digitales DDO1602, tres módulos de entradas analógicas AMI 0402, y dos módulos de salidas analógicas AMO 0210 (Figura 31). Para su programación, se emplea el entorno de desarrollo Unity Pro XL V11.0 también de Schneider. La CPU BMX P34 20302 ofrece las prestaciones que se indican en la Tabla 13.

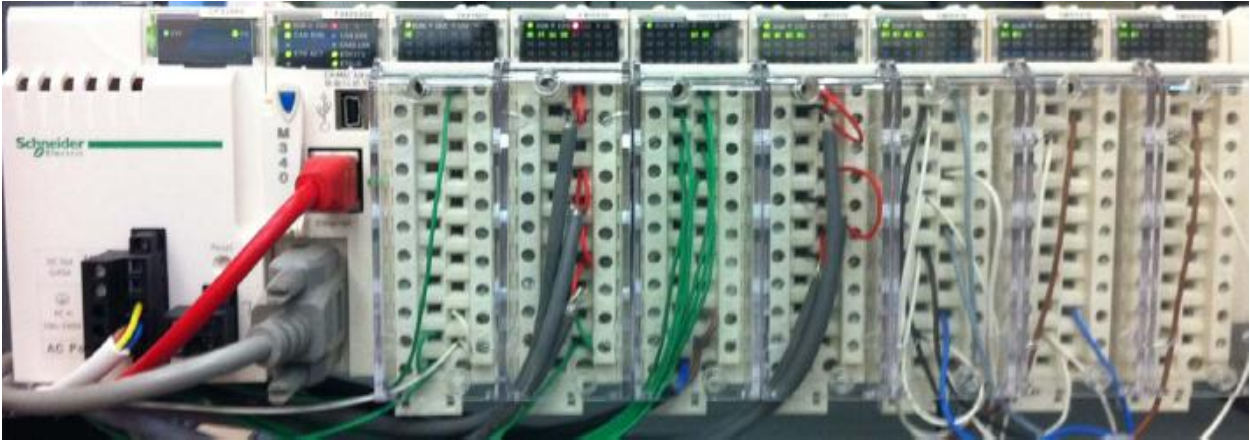


Figura 31. Plataforma de automatización M340 de Schneider empleada para la implementación del *First Level Controller*.

Tabla 13. Características de la plataforma de automatización M340 de Schneider.

Modicon M340 automation platform features	
Discrete I/O processor capacity	1024 I/O multiple-rack configuration
	704 I/O single-rack configuration
Analogue I/O processor capacity	256 I/O multi-rack configuration
	66 I/O single-rack configuration
Communication interfaces	Modbus TCP/IP. 10/100 Mbit/s. RJ45.
	CANopen. 0.3...19.2 kbit/s. RS232C.
	USB 2.0 12 Mbit/s.
Memory description	4096 kB internal RAM
	256 kB internal RAM for data
	3584 kB internal RAM for program constants and symbols.
Application structure	No auxiliary task
	1 cyclic/periodic master task
	1 periodic fast task
	64 event tasks
Execution time per instruction	0.12 μ s Boolean
	0.17 μ s double-length words
	0.25 μ s single-length words
	1.16 μ s floating points.
Number of instructions per ms	6.4 Kinst/ms 65% Boolean + 35% fixed arithmetic
	8.1 Kinst/ms 100% Boolean

Las funcionalidades que implementa el FLC son las siguientes:

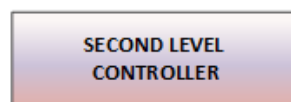
- **Ejecución de la secuencia de puesta en marcha de la Microrred.**
- **Ejecución de la secuencia de parada de la Microrred.**
- **Gestión de los diferentes modos de funcionamiento de la Microrred.**
- **Recopilación y acondicionamiento para la disposición del SLC del conjunto de medidas de magnitudes, registros de estados, registros de flags y señales de realimentación leídas en los FECs mediante las interfaces de comunicación o captadas a través de los módulos de entradas y salidas.**
- **Acondicionamiento y envío de comandos y setpoints a los FECs de los equipos de la Microrred dentro de cada modo de funcionamiento.**
- **Control y regulación mediante lazos o algoritmos de control de variables en aquellos equipos y sistemas que no dispongan de FEC.**
- **Detección y notificación de condiciones de error o fallo en la Microrred.**
- **Ejecución de la secuencia de puesta en estado de emergencia de la Microrred en caso de detección de error o fallo para la protección de los equipos.**
- **Disposición de un HMI para operación básica de la Microrred.**
- **Comunicación con los FECs mediante interfaces digitales o analógicas, o mediante protocolo estándar/propietario sobre bus de campo.**
- **Comunicación con el SLC mediante una comunicación estándar.**

El SLC consiste en un ordenador personal de sobremesa, en el cual está instalado el software MATLAB R2018B, para la ejecución a través de Simulink de los diferentes algoritmos y estrategias de control para la gestión de la Microrred, principalmente controladores basados en modelos de predicción. La comunicación entre el entorno Simulink y el programa del FLC se realiza mediante un cliente OPC a través de USB.

En la Figura 32, se muestra un esquema de la arquitectura de control de la Microrred del Hylab, con los flujos de información entre los distintos elementos de control.

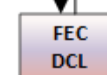
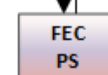
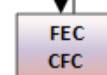
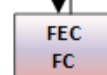
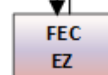
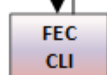
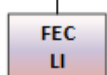
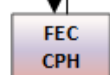
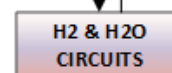
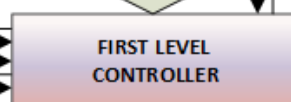
Control Layer 2

Control Algorithms and Strategies for Management of Energy



Control Layer 1

Management of Microgrid Operation Modes



Control Layer 0

Management of Operation Modes and Power Generation for each Item

Figura 32. Arquitectura de control de la Microrred del Hylab.

2.12 Descripción de la arquitectura de comunicaciones

En la Figura 33 se muestra un esquema de la arquitectura de comunicaciones de la Microrred del Hylab. El FLC se comunica con los equipos de la Microrred a través de diversos protocolos de comunicaciones.

Se utiliza una red Modbus TCP/IP para la comunicación entre el FLC y los FECs del Electrolizador y del convertidor DC/DC para el stack de baterías de litio. Se ha considerado la comunicación de una estación meteorológica que se instalará en el futuro, que también empleará el protocolo Modbus TCP/IP.

Mediante una red CANopen equipada con dos pasarelas CAN/CANopen del fabricante ADFweb (Figura 34), el FLC se comunica con el BMS del stack de baterías de litio, los FECs de la pila de hidrógeno y de su convertidor DC/DC asociado, y con el FEC del convertidor DC/DC asociado al campo de paneles fotovoltaicos.

La comunicación entre el FLC y la fuente de alimentación DC programable se realiza mediante señales analógicas de tensión. La comunicación entre el FLC y la carga electrónica programable también se realiza con señales analógicas de tensión.

Finalmente, la comunicación entre el FLC y el SLC se realiza mediante USB. Dentro de la workstation que implementa al SLC, la comunicación entre el entorno Simulink de MATLAB y el puerto USB se establece mediante el software OPC Factory Server V3.60 de Schneider, que incorpora un servidor OPC, y las funciones de la librería OPC Toolbox de MATLAB.

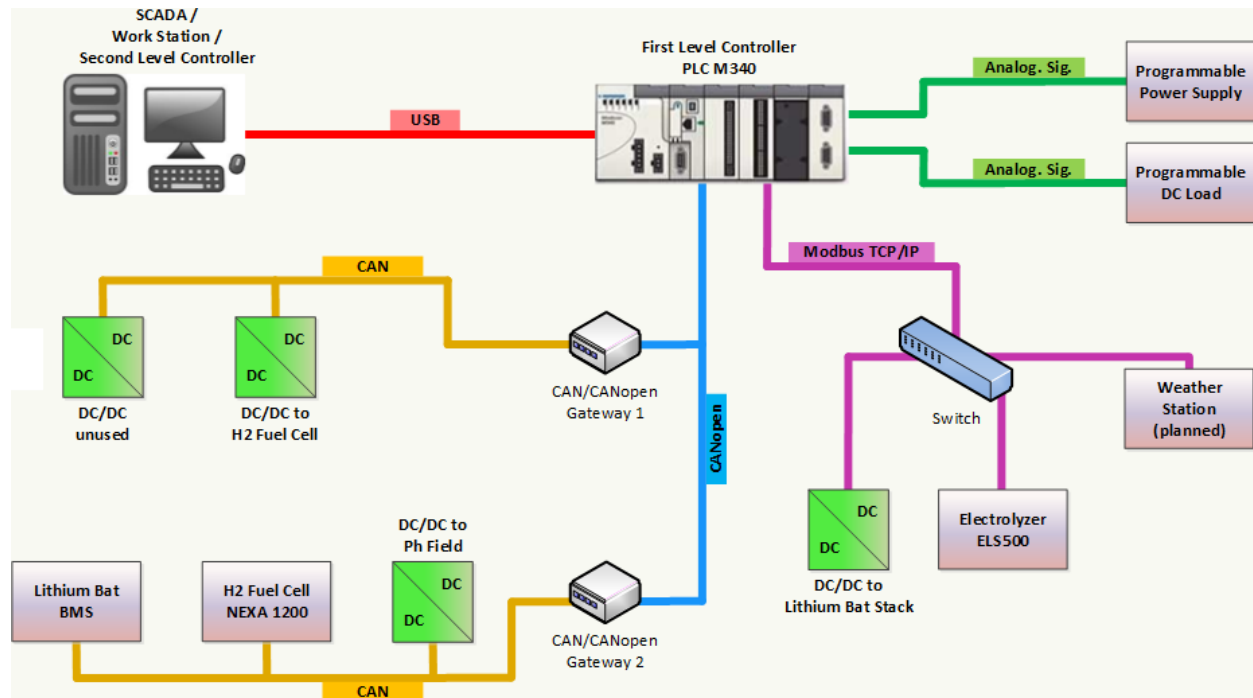


Figura 33. Arquitectura de comunicaciones.



Figura 34. Pasarela CAN/CANopen de ADFweb.

3 INTEGRACIÓN DE NUEVOS EQUIPOS EN LA MICRORRED DEL HYLAB

3.1 Introducción

A lo largo de estos últimos años, sobre la Microrred experimental del HyLab se han efectuado una serie de modificaciones y ampliaciones, fundamentalmente con el fin de actualizarla para poder realizar nuevos proyectos de investigación.

La primera ampliación consistió en la instalación del campo de paneles fotovoltaicos y su convertidor DC/DC, para que la Microrred dispusiera de una fuente real de generación fotovoltaica.

Posteriormente, el electrolizador original de la Microrred, que había sido prestado por INTA (Instituto Nacional de Tecnologías Aeroespaciales), fue sustituido por el electrolizador Acta Heliocentris EL500.

Debido a su degradación, la pila de hidrógeno original hubo de ser reemplazada. Fue sustituida por la nueva pila de hidrógeno NEXA 1200.

Por último, para que la Microrred dispusiera de un segundo sistema de almacenamiento, se añadió un stack de baterías de litio con un convertidor DC/DC bidireccional.

En los siguientes apartados, se describen los trabajos que se han realizado, dentro del alcance del presente proyecto, para la integración de estos nuevos equipos y sistemas en la Microrred.

3.2 Integración del electrolizador Acta Heliocentris EL500

3.4.1 Generalidades

Para la integración en la Microrred del electrolizador Acta Heliocentris EL500 era necesario, en primer lugar, implementar una comunicación entre el electrolizador y el FLC, y desarrollar en Unity Pro todo el código necesario para realizar la monitorización y el envío de comandos desde el FLC al electrolizador. En este punto, se ha tomado como base el trabajo realizado por José María Rondán Galán, expuesto en su Trabajo de Fin de Grado "*Automatización, Operación y Caracterización de un Electrolizador AEM*" [3], dirigido por [Javier Pino Lucena](#).

Una vez conseguida la monitorización y comando remotos desde el FLC, el siguiente paso ha consistido en implementar un control por histéresis para la presión en los stacks del electrolizador, necesario debido a las características particulares del circuito de hidrógeno al cual se halla conectado.

Por último, a partir de los resultados generados en una serie de ensayos que se han realizado, se obtuvo una caracterización del comportamiento estático y dinámico del electrolizador, descrita en términos de tres curvas características (*Caudal de H₂ - Consigna Porcentual*, *Caudal de H₂ - Potencia de Stacks*, y *Potencia de Stacks - Consigna Porcentual*) y un conjunto de cotas temporales. Era necesario caracterizar el comportamiento estático y la dinámica del electrolizador, en primer lugar, para poder realizar una conversión del *setpoint* porcentual de caudal en un *setpoint* de potencia, con vistas al control del balance de potencias en el bus principal de la Microrred, y, por otro lado, para poder desarrollar modelos del electrolizador que puedan emplearse tanto en simulación como en algoritmos de control predictivo.

En los siguientes apartados, se ofrece una descripción más detallada de los diferentes trabajos realizados para la integración del electrolizador EL500 en la Microrred.

3.4.2 Implementación de la comunicación entre el electrolizador y el FLC. Desarrollo de un programa de pruebas para monitorización y comando del electrolizador desde el FLC.

Tanto para la implementación de la comunicación Modbus como para el desarrollo en Unity Pro de la codificación necesaria para la monitorización y el envío de consignas del electrolizador desde el FLC, se ha recurrido al programa realizado por José María Rondán Galán para la automatización del electrolizador en su Proyecto Fin de Grado.

Tomando como base dicho programa, se ha decidido emplear los mismos códigos para la configuración de la comunicación Modbus y para la lectura y escritura de los registros del electrolizador. Se ha añadido un gestor para la comunicación Modbus (Figura 35), que envía peticiones para la lectura de todos los registros del electrolizador de manera cíclica, cada 500 ms. Este gestor también se encarga de enviar, de manera asíncrona y por eventos, los mensajes Modbus con los códigos correspondientes a los comandos de *Start*, *Stop* y *Reset*, así como las tramas en las que se empaqueta el valor del *setpoint* de caudal porcentual para su envío.

Para la obtención de los registros con el estado y los flags de error y las medidas de magnitudes del electrolizador a partir de la información recibida mediante la lectura Modbus, se ha decidido emplear también la misma codificación que en el programa de José María Rondán, que emplea una técnica basada en el solapamiento de posiciones de memoria del PLC (Figura 36).

Finalmente, se ha desarrollado un nuevo programa de pruebas en Unity Pro que, además de la monitorización y comando del electrolizador, dispone de indicadores y controles para el manejo de los circuitos de agua e hidrógeno de la Microrred, y que además incluye un control por histéresis para la presión de los stacks cuya implementación se describe en el siguiente apartado. Este nuevo programa, que además dispone de una interfaz propia (Figura 37), se ha empleado tanto para verificar la correcta implementación de la monitorización y comando remotos como para la realización de los ensayos para la caracterización del electrolizador.

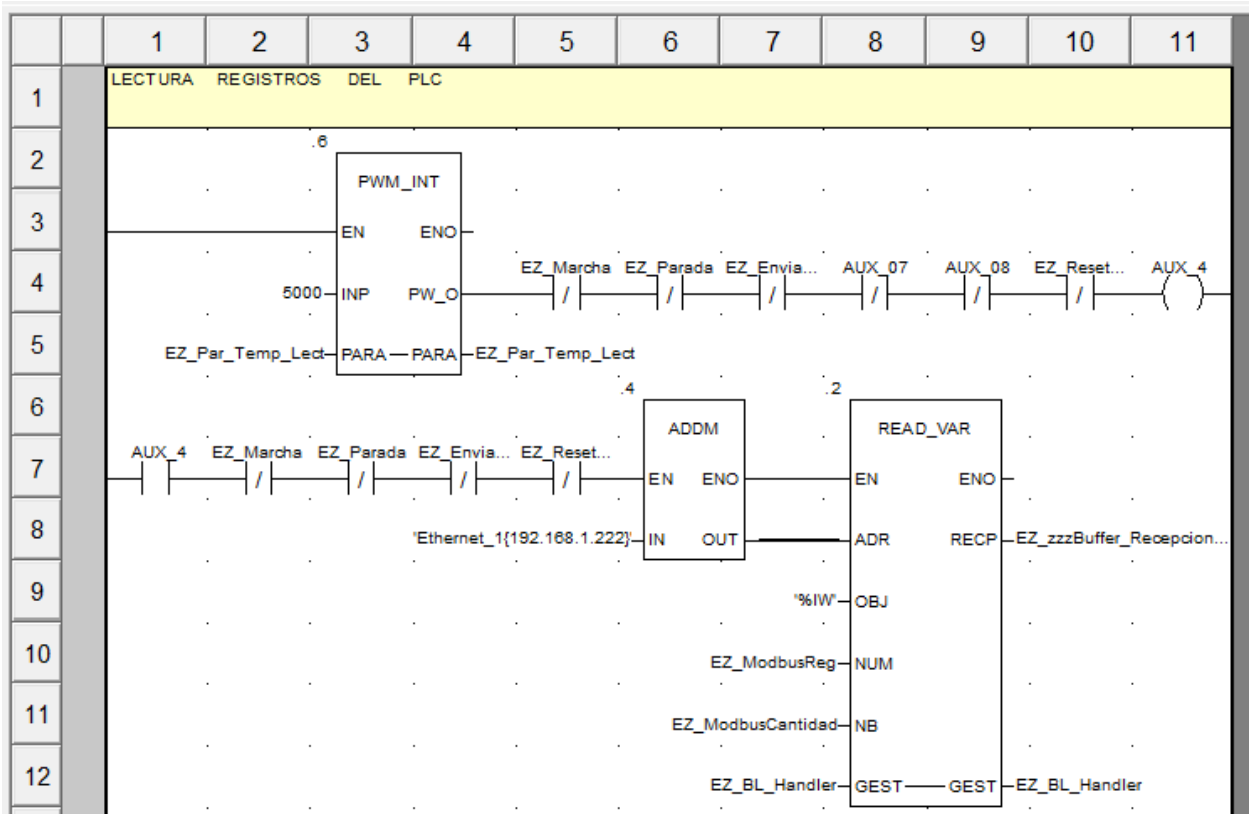


Figura 35. Implementación en Unity Pro del gestor para la comunicación Modbus.

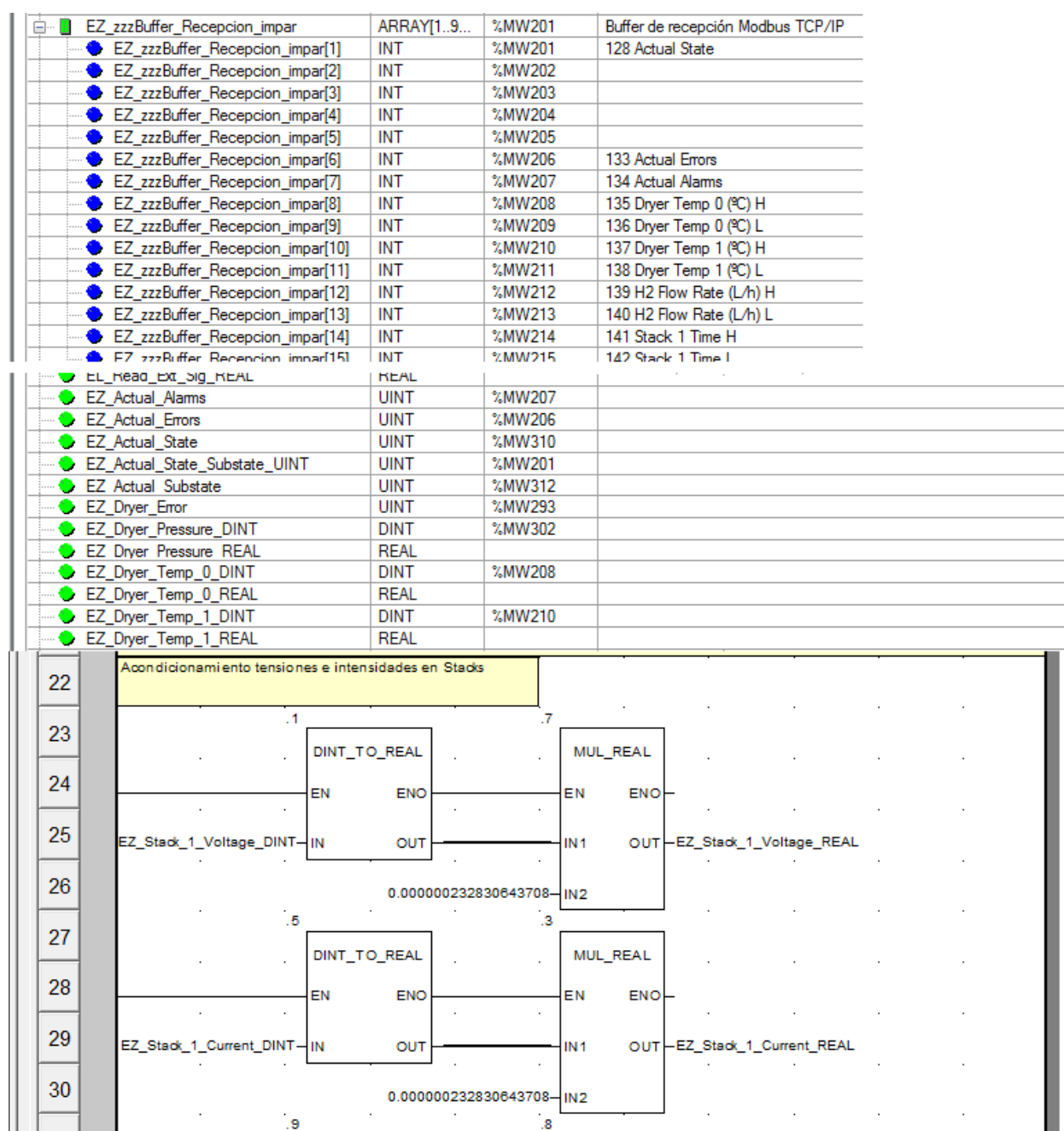


Figura 36. Obtención del estado, los flags de errores y las medidas de magnitudes del electrolizador a partir de la información obtenida por Modbus. Ejemplo de solapamiento de posiciones de memoria y código de acondicionamiento.

ESTADO ELECTROLIZADOR		ESTADO SECADOR		STACK 1		STACK 2	
<div>HEATING</div> <div>ALARMA</div> <div>ERROR</div>		<div>LEAK TEST</div> <div>ERROR</div>		Tensión (V) <div>####.###</div>		Tensión (V) <div>####.###</div>	
				Intensidad (A) <div>####.###</div>		Intensidad (A) <div>####.###</div>	
FY01 Abrir <div></div>		EV H2 de electrolizador		MARCHA / PARADA		POTENCIAS	
FY01 Cerrar <div></div>				<div></div> <div></div>		Potencia consumida módulo A (W) <div>####.###</div>	
FY02 Abrir <div></div>		EV H2 alimentación pila		CONSIG. INTENSIDAD		PRESIONES	
FY02 Cerrar <div></div>				<div></div> <div></div>		Presión de salida electrolizador (bar) <div>####.###</div>	
FY03 Abrir <div></div>		EV H2 inertización de conducciones				Presión del módulo (bar) <div>####.###</div>	
FY03 Cerrar <div></div>						Presión salida del módulo (bar) <div>####.###</div>	
FY04 Abrir <div></div>		EV H2 procedente de botellas		Tª H2 entrada hidruros (°C) <div>####.###</div>		TEMPERATURA / CAUDAL H2	
FY04 Cerrar <div></div>				Tª Agua salida circuito (°C) <div>####.###</div>		Tª agua módulo A (°C) <div>####.###</div>	
FY05 Abrir <div></div>		EV agua caliente hidruros y bomba		Tª Agua entrada circuito (°C) <div>####.###</div>		Caudal de H2 (L/h) <div>####.###</div>	
FY05 Cerrar <div></div>				Caudal Agua (L/min) <div>####.###</div>			
FY06 Abrir <div></div>		EV entrada agua fría hidruros		Presión ent hidruros (barg) <div>####.###</div>		SECADOR	
FY06 Cerrar <div></div>				Presión H2 Entrada FC (barg) <div>####.###</div>		Stack 1 Time (s) <div>####</div>	
				Caudal H2 (NL/min) <div>####.###</div>		Stack 2 Time (2) <div>####</div>	
Reset Marcha <div></div>				Tª 0 (°C) <div>####</div>		Nº Ciclos Stack 1 <div>####</div>	
Reset Parada <div></div>				Tª 1 (°C) <div>####</div>		Nº Ciclos Stack 2 <div>####</div>	
				Presión (bar) <div>####</div>			

Figura 37. Interfaz del programa de pruebas para el electrolizador.

3.4.3 Implementación del control por histéresis para la presión en el buffer de salida del electrolizador.

Los stacks del electrolizador EL500 emplean una membrana de intercambio aniónico fabricada con polímero sólido, lo cual proporciona una separación física entre las cámaras del ánodo y del cátodo que impiden la mezcla del hidrógeno y del oxígeno generados durante la electrólisis. No obstante, debido a que la membrana no ofrece una estanqueidad absoluta, es necesario que los stacks trabajen a una presión mínima de 30 bares, para incrementar el valor límite de inflamabilidad del ratio H_2/O_2 y de esta manera conseguir el nivel de seguridad requerido para el uso del equipo.

Por otra parte, para evitar presiones excesivas que pudieran ocasionar daños irreversibles en los stacks o en el circuito interno del electrolizador, se tiene un límite máximo de 35 bares para la presión en los stacks. El equipo dispone de un sistema de protección contra sobrepresiones que, cuando se supera dicho límite, corta la producción de hidrógeno, realiza una purga para despresurizar los stacks, y lleva al equipo al estado de *Standby*, generando una indicación de la condición de error.

El electrolizador EL500 dispone de un buffer de salida situado entre los stacks y el punto de conexión con la red externa en la cual se inyecta el hidrógeno producido, como se muestra de forma esquemática en la Figura 38. La misión de este buffer es amortiguar las fluctuaciones de presión ocasionadas tanto por las variaciones de caudal debidas a cambios de setpoint como por las condiciones del circuito externo.

Cuando el electrolizador está produciendo hidrógeno según un determinado valor de setpoint, si la presión de los stacks cae por debajo de 30 bares su sistema de control actuará incrementando la generación de hidrógeno, pudiéndose alcanzar el máximo de 510 NI/h a despecho del valor de setpoint especificado, hasta que se recupera nuevamente la presión de 30 bares en los stacks.

En los primeros ensayos que se realizaron para la caracterización del electrolizador EL500 se observó que los decrementos en el caudal de producción de hidrógeno ocasionan pérdidas de presión en los stacks. La magnitud de esta pérdida de presión será mayor cuanto mayor sea el descenso en el caudal de producción, y dependerá también del nivel de llenado de los tanques de hidruros metálicos, de tal manera que cuanto más llenos se encuentren los tanques menor será la pérdida de presión en los stacks, y viceversa.

Un cambio en el setpoint del electrolizador para reducir el caudal de hidrógeno que se produce puede ocasionar que la presión de los stacks caiga por debajo de los 30 bares. Entonces entraría en acción el sistema de control del electrolizador incrementando la generación de hidrógeno para volver a presurizar los stacks por encima de los 30 bares. Pero cuando la presión en los stacks alcanza nuevamente los 30 bares, la producción de hidrógeno vuelve a reducirse hasta el valor de setpoint que se ha especificado, provocando que la presión en los stacks caiga otra vez por debajo de los 30 bares, actuando de nuevo el sistema de control del electrolizador para recuperar la presión de los stack incrementando otra vez la generación de hidrógeno. Esto puede derivar en una inestabilización de la producción de hidrógeno, que ocasionará grandes oscilaciones en el consumo de potencia del electrolizador que resultan inadmisibles de cara al control del balance de potencias en el bus principal de la Microrred.

Para solventar este problema, se ha implementado un control por histéresis que mantiene la presión en el buffer de salida entre los 30 y los 35 bares, actuando sobre la electroválvula FY01 del circuito de hidrógeno de la Microrred, situada justo a continuación del punto de conexión del electrolizador para permitir o cortar el paso del hidrógeno hacia los tanques de hidruros, como se muestra en la Figura 38.

El control por histéresis actúa de la siguiente forma:

- Si la presión en el buffer de salida desciende por debajo de cierto valor umbral, la electroválvula FY01 se cierra, para que tanto el buffer de salida como los stacks recuperen presión sólo con el caudal de hidrógeno que se esté produciendo en ese momento.
- Si la presión en el buffer de salida supera cierto valor umbral, la electroválvula FY01 se abre, para que la producción de hidrógeno sea almacenada en los tanques de hidruros metálicos.

El electrolizador dispone internamente de dos válvulas para permitir o cortar el paso del hidrógeno desde los stacks al buffer de salida, y desde el buffer de salida al circuito externo respectivamente. Podría haberse implementado un control por histéresis que actuase sobre alguna de estas válvulas; sin embargo, el FEC del electrolizador no permite comandarlas de manera remota.

En la Figura 39, se muestran las curvas de presión en los stacks y en el buffer de salida obtenidas en un ensayo realizado para comprobar el funcionamiento del control por histéresis. Los valores umbrales que se emplearon fueron de 31 y 33.5 bares. El estado de carga de los tanques de hidruros era del 40%. A lo largo del ensayo, se generaron grandes variaciones en el caudal de producción de hidrógeno, cuya curva también se incluye en la gráfica, mediante la manipulación de su valor de *setpoint*.

El control por histéresis funcionó correctamente excepto en el entorno de los 2700 segundos, después de que el caudal de hidrógeno variase desde los 510 NI/h hasta su valor mínimo admisible de 107.1 NI/h. Puede observarse en la gráfica cómo se produce un pequeño pico en la generación cuya duración fue de unos pocos segundos. En otro ensayo realizado posteriormente, el umbral mínimo del control por histéresis fue incrementado hasta los 31.5 bares, y no volvió a observarse este problema.

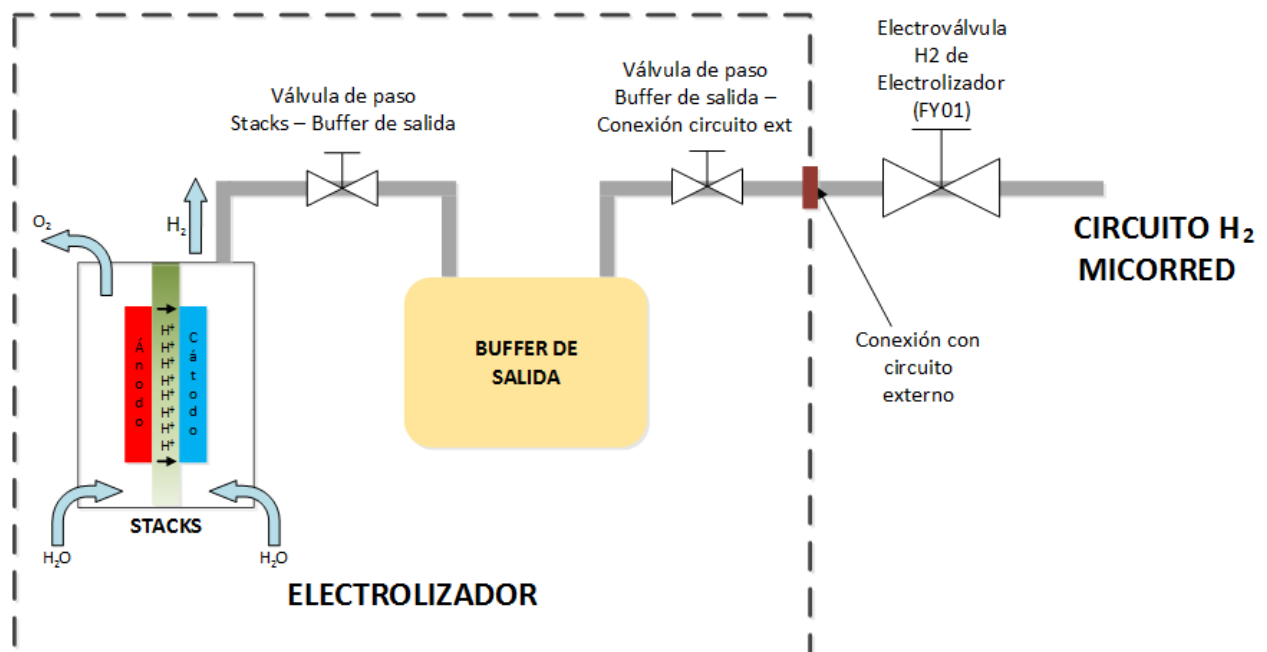


Figura 38. Representación del circuito de hidrógeno del electrolizador.

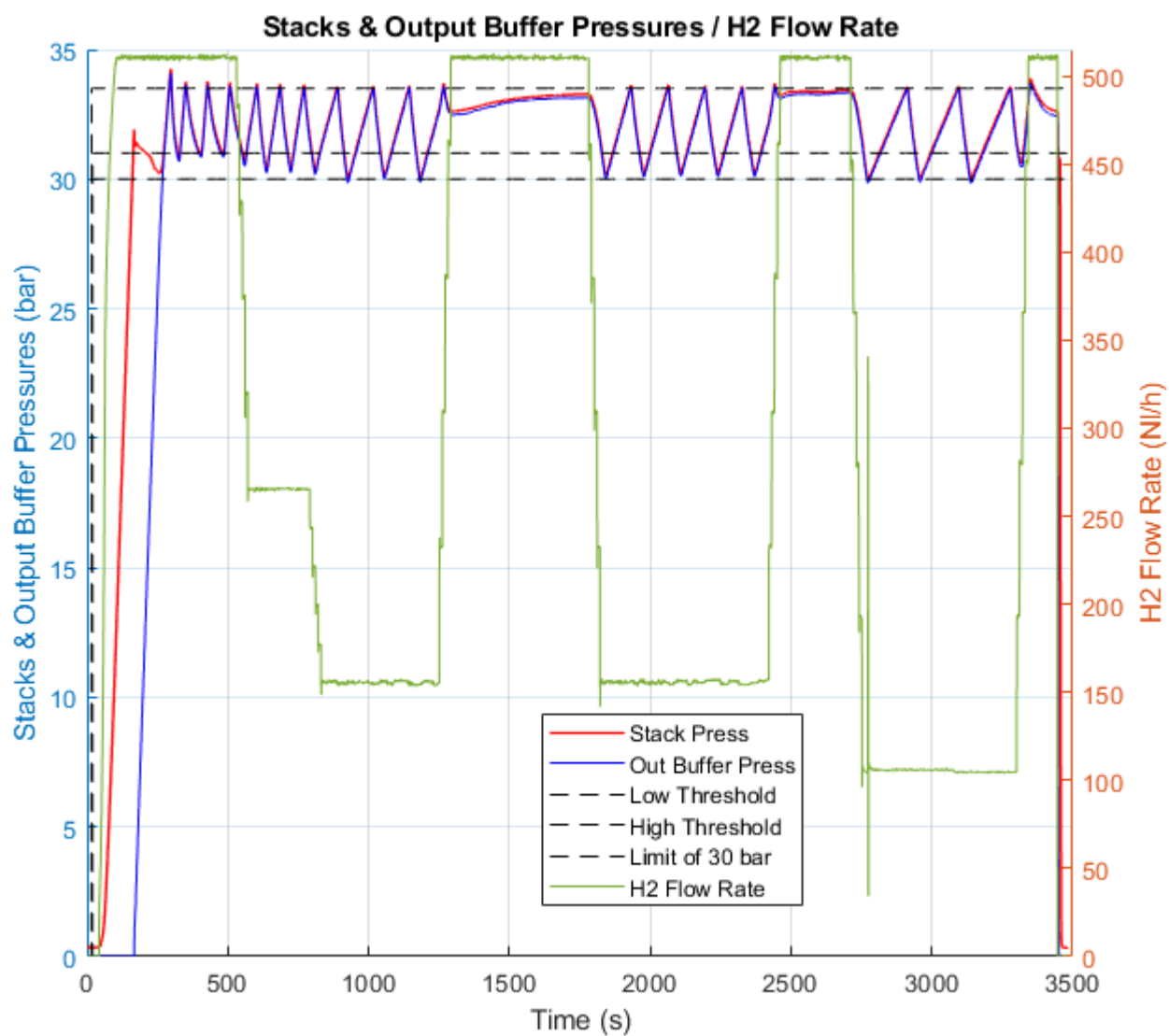


Figura 39. Curvas de presión y de caudal de hidrógeno en el ensayo para la prueba del control por histéresis de la presión en los stacks.

3.4.4 Características estáticas y dinámicas del electrolizador EL500

Dado que los algoritmos y estrategias de control que se van a implementar en el SLC están basados en la gestión del balance de potencias en el bus principal de la Microrred, se hacía necesario caracterizar el comportamiento estático del electrolizador, primeramente con una curva de conversión que relacionase el caudal de hidrógeno producido con la potencia consumida por los stacks, a fin de poder regular la producción de hidrógeno desde el SLC en términos de un *setpoint* de potencia. Por otro lado, también era necesaria una curva de conversión que relacione la potencia consumida por los stacks con la consigna porcentual enviada al electrolizador.

A partir de los ensayos que se han realizado, cuyos resultados están recopilados en el Anexo IV, se han obtenido las curvas características de *Caudal de H₂ - Potencia de Stacks* y *Consigna Porcentual - Potencia de Stacks* que se muestran en la Figura 40 y Figura 41, y que vienen definidas por la Ecuación 3-1 y la Ecuación 3-2.

$$Q_{H_2} = 0.2253 \frac{Nl}{h \cdot W} \cdot P_{stacks} + 35.174 \frac{Nl}{h}$$

Ecuación 3-1.

$$Setpoint = 0.0433 \frac{\%}{W} \cdot P_{stacks} + 5.4659\%$$

Ecuación 3-2

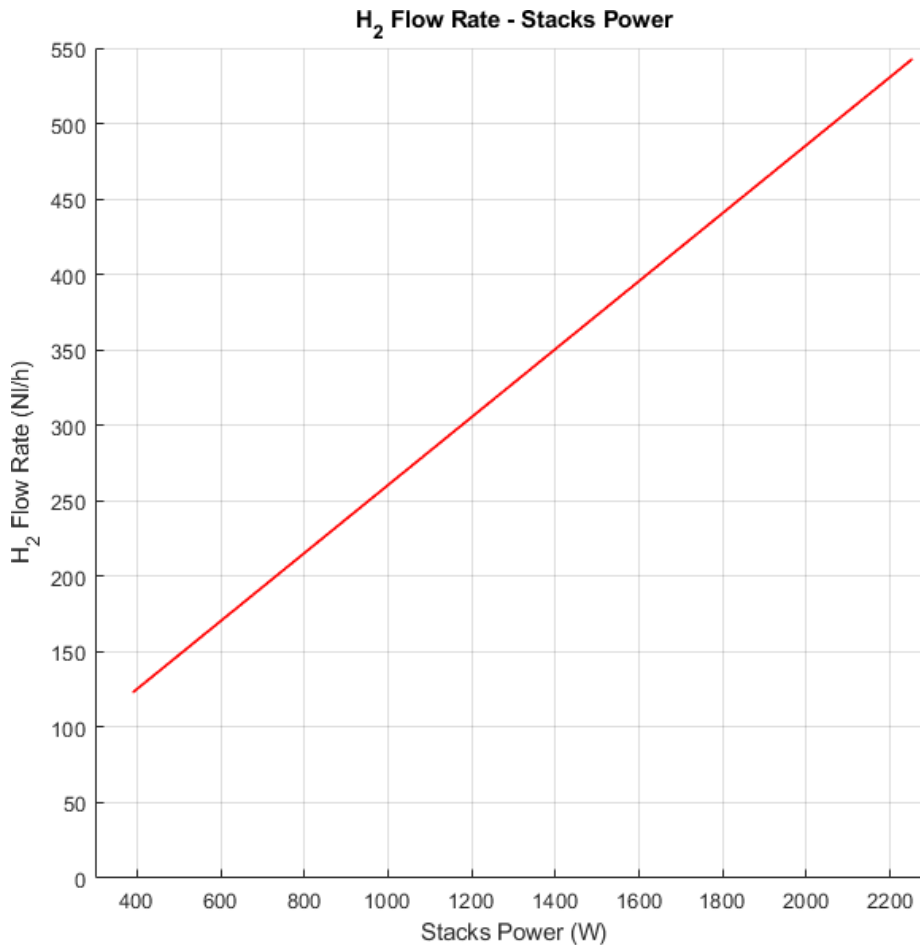


Figura 40. Característica *Caudal de H₂ - Potencia de Stacks*.

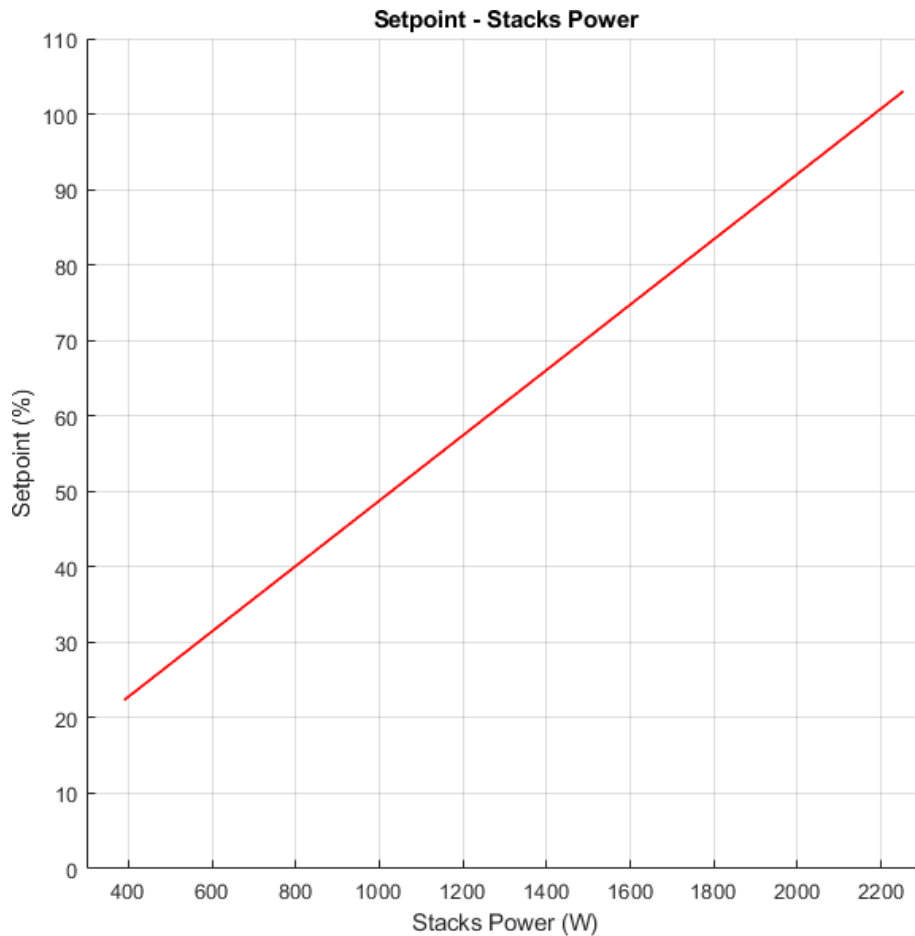


Figura 41. Característica *Consigna Porcentual - Potencia de Stacks*.

Sin embargo, el comportamiento estático del electrolizador no ha quedado completamente caracterizado. La potencia que se ha considerado para obtener estas curvas es sólo la potencia que consumen los stacks. No se ha tenido en cuenta la potencia consumida por la instrumentación del electrolizador, que también es tomada del bus principal de la Microrred, y que puede suponer hasta 700 W adicionales sobre la potencia consumida por los stacks según se especifica en el manual del equipo. El FEC del electrolizador no ofrece medidas de dicha potencia, y cuando se realizaron los ensayos no se pudo disponer de ningún equipo que la midiese.

En el futuro, se prevé la instalación de un amperímetro en el bus de alimentación del electrolizador. Será necesario realizar más ensayos, y estudiar cómo varía este consumo de potencia adicional en función del caudal de hidrógeno generado, o cuando se activa la ventilación del electrolizador al superarse ciertos límites de temperatura.

Era necesario realizar también una caracterización del comportamiento dinámico del electrolizador, con el fin de poder desarrollar modelos matemáticos que puedan ser empleados tanto en simulación como en estrategias de control predictivo.

La dinámica del electrolizador EL500 ante un cambio en el setpoint durante la producción de hidrógeno es la que se muestra en la Figura 42. El caudal de producción de hidrógeno aumentará o disminuirá de manera escalonada, con incrementos o decrementos en torno a los 75 NI/h, y con un tiempo de establecimiento siempre en torno a los 60 segundos, independientemente de la magnitud de la variación del setpoint.

La dinámica del electrolizador durante el proceso de arranque puede ser descrita en términos de una serie de etapas, cada una con sus respectivas cotas temporales. Dichas etapas son las siguientes:

- **Etapas de Hidratación de los Stacks.** Durante esta etapa no se produce hidrógeno. Según se ha observado en los ensayos realizados, puede durar entre 30 y 60 segundos.
- **Etapas de Presurización de los Stacks.** Durante esta etapa, los stacks generan la mayor cantidad posible de hidrógeno, pudiéndose alcanzar una producción correspondiente a la del caudal máximo de 510 NI/h, para conseguir una presurización en los stacks por encima de los 30 bares. Una vez los stacks se presurizan por encima de dicha presión, se abre la electroválvula que permite el paso del hidrógeno al buffer de salida y comienza la siguiente etapa. Según se ha observado en los ensayos realizados, la etapa de presurización de los stacks puede durar hasta 125 segundos si han transcurrido menos de 30 minutos desde que el electrolizador estuvo produciendo hidrógeno por última vez, y hasta 700 segundos si ha transcurrido más tiempo.
- **Etapas de Presurización del Buffer de Salida.** Durante esta etapa, se produce hidrógeno según la consigna especificada para presurizar el buffer de salida, hasta alcanzar también una presión por encima de los 30 bares. Una vez se alcanza dicha presión, comienza la inyección del hidrógeno al circuito externo. La etapa de presurización del buffer de salida puede durar desde 32 segundos hasta 20 minutos, dependiendo del caudal de producción.

En la Figura 43, se muestran las curvas de presión de los stacks y del buffer de salida, así como la curva del caudal de producción de hidrógeno, durante el proceso de arranque del electrolizador.

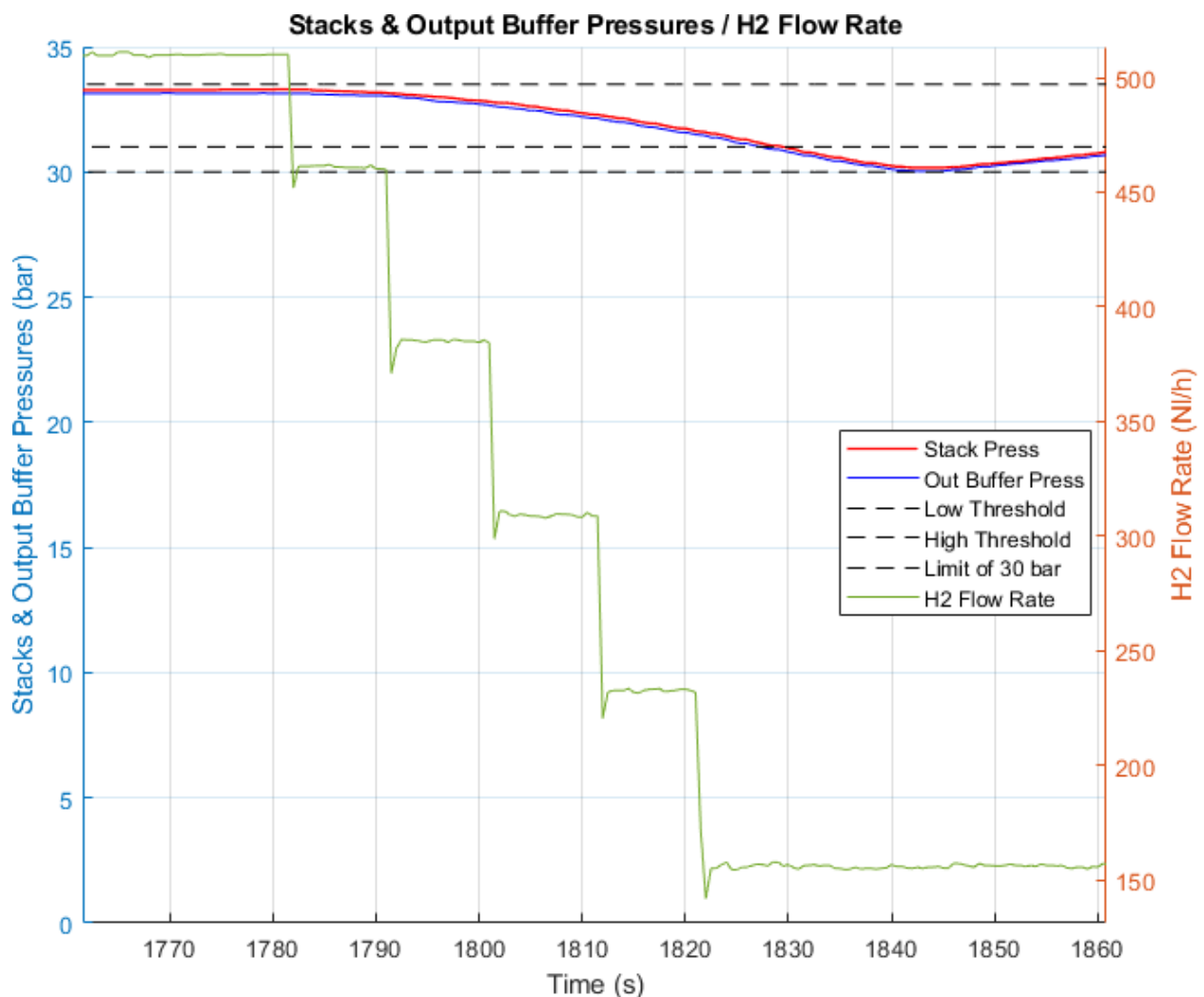


Figura 42. Variación del caudal de producción de hidrógeno ante un cambio de *setpoint*.

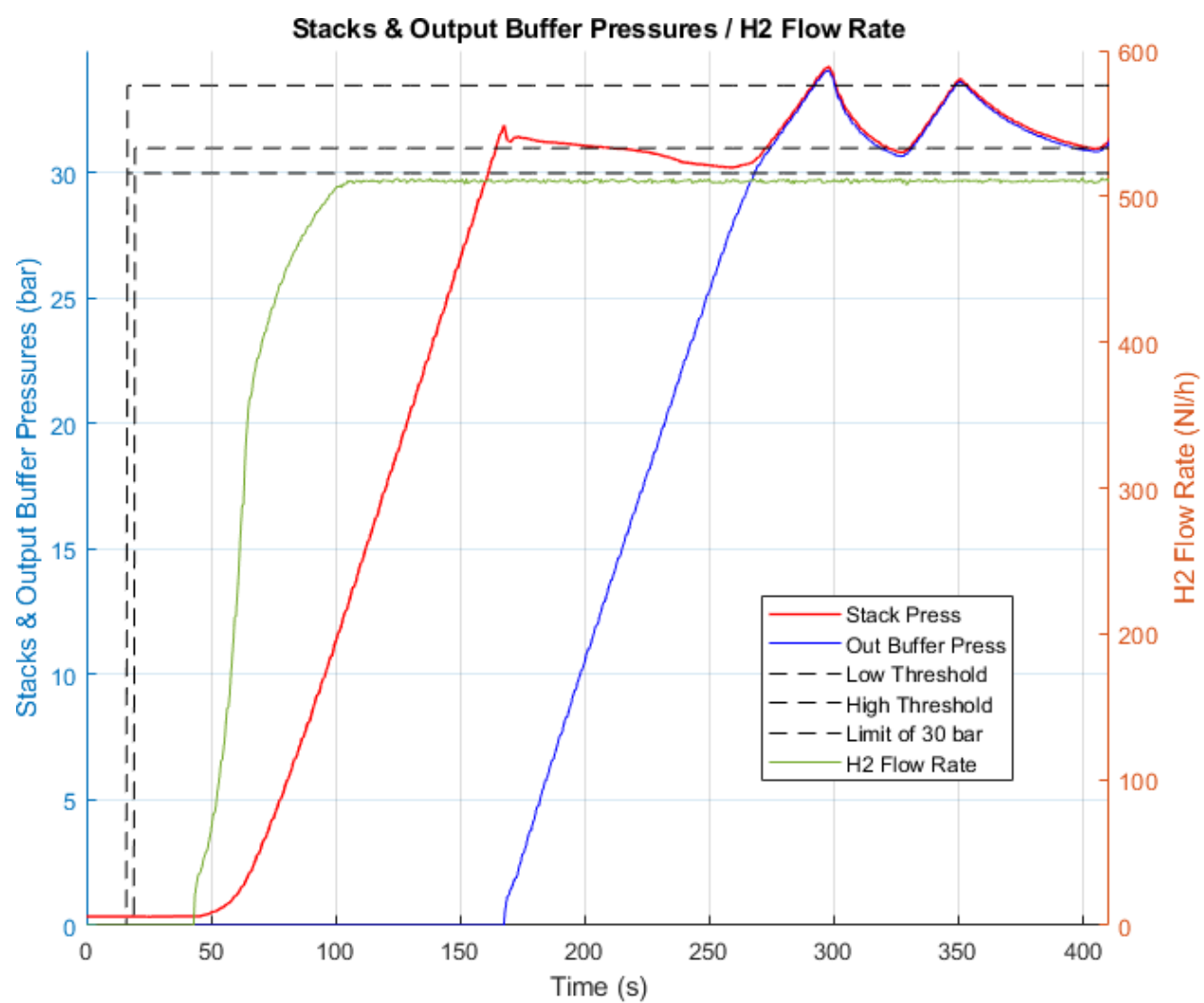


Figura 43. Curvas de presión de los stacks y del buffer de salida, y curva de generación de H_2 , durante el proceso de arranque del electrolizador.

3.5 Integración de la pila de hidrógeno Acta Heliocentris Nexa 1200

Antes de la realización del presente proyecto, la nueva pila de hidrógeno NEXA 1200 ya había sido montada en su actual ubicación, cableada su convertidor DC/DC y conectada al circuito de hidrógeno. Sin embargo, para completar la integración de la nueva pila de hidrógeno en la Microrred era necesario implementar su comunicación con el FLC para la monitorización y comando desde el siguiente nivel de control.

Como ya se ha indicado en el apartado 2.5.7, la pila de hidrógeno NEXA 1200 dispone de una interfaz CAN 2.0. Para poder implementar su comunicación con el FLC, ha sido necesario añadir a la instalación una segunda pasarela ADFweb CAN/CANopen.

Por otra parte, era necesario también desarrollar un código de programa en Unity Pro para la monitorización y comando remotos de la pila de hidrógeno desde el FLC, y a partir de dicho programa implementar unos bloques de pretratamiento y comando que pudieran ser utilizados en la programación del primer nivel de control.

Para completar la integración de la pila de hidrógeno en la Microrred, se realizaron las siguientes acciones:

- Montaje de la pasarela ADFweb CAN/CANopen (Figura 44).
- Cableado de la pasarela ADWweb CAN/CANopen a la interfaz CAN de la pila de hidrógeno y a la interfaz CANopen del FLC.
- Configuración de la pasarela CAN/CANopen, para la definición de las PDOs de recepción y transmisión, y del empaquetamiento en las mismas de las tramas CAN transmitidas a y recibidas desde la pila de hidrógeno (Figura 45).
- Creación de un proyecto de pruebas en Unity Pro para comprobar la comunicación entre la pila de hidrógeno y el FLC. En el mismo programa, también se ha desarrollado toda la programación relativa al procesado y acondicionamiento de las tramas recibidas, con la información empaquetada según se indica en el *datasheet* del equipo (véase apartado 7.1.5). También, se ha implementado aquí la generación de las tramas correspondientes a los comandos de encendido, apagado y rearme de la pila.
- Desarrollo de un bloque de pretratamiento en el entorno Unity Pro para la obtención de los estados y las medidas de magnitudes de la pila de hidrógeno a partir del procesado y acondicionamiento de las tramas CANopen recibidas.
- Desarrollo de un bloque de control en el entorno Unity Pro para la generación de las tramas CANopen necesarias para los comandos de encendido, apagado y rearme de la pila de hidrógeno, conteniendo los códigos que se indican en el *datasheet* del equipo.

Los bloques de pretratamiento y de control han sido desarrollados para ser incluidos en un programa implementado según el modelo de jerarquía estructurada para programación de PLCs propuesto por el estándar abierto PLCOpen. Sus especificaciones se describen de manera detallada en el apartado 4.5.3.

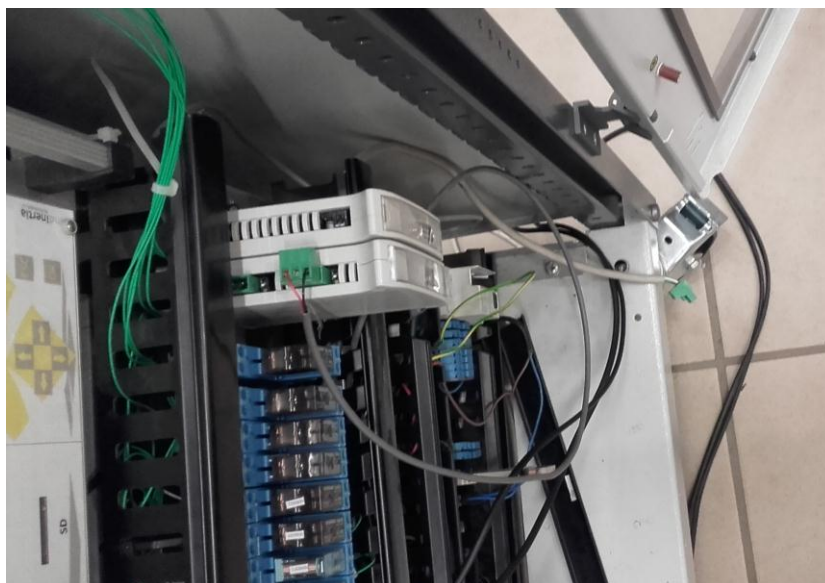


Figura 44. Montaje de la pasarela ADFweb CAN/CANopen.

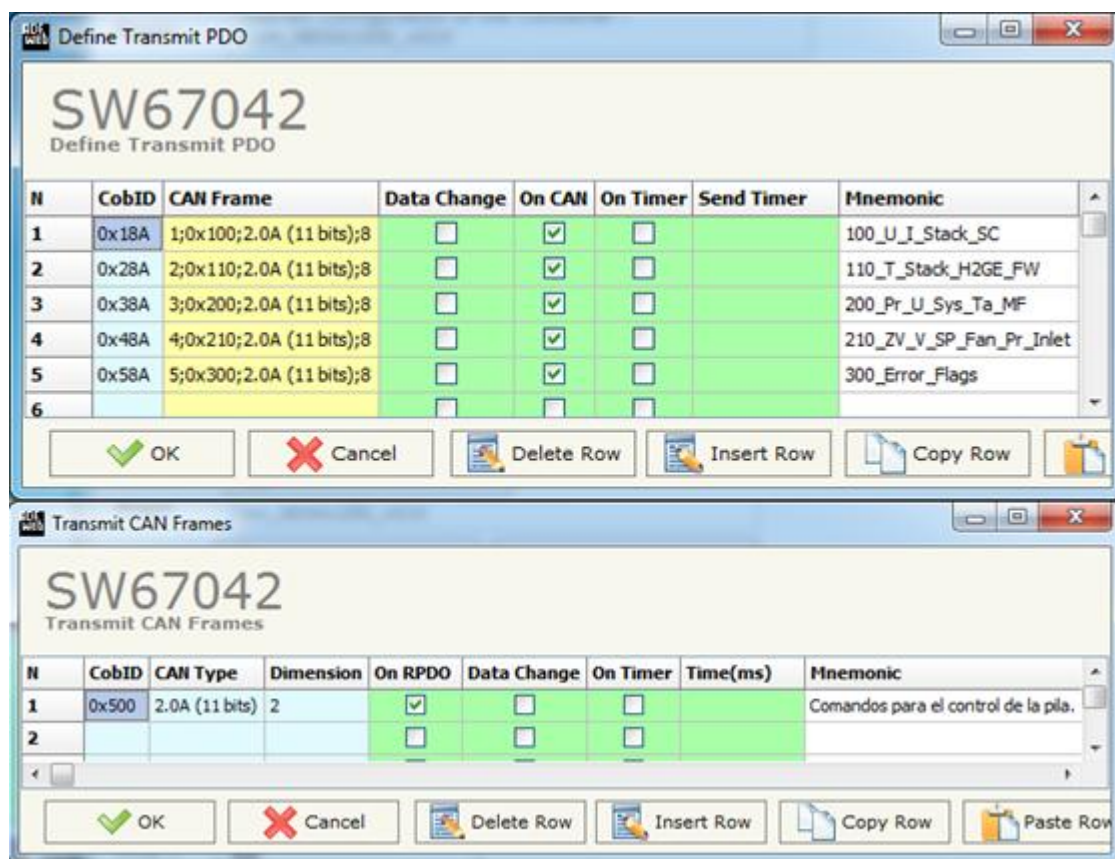


Figura 45. Definición de las PDOs de recepción y transmisión para la pasarela ADFweb CAN/CANopen.

3.6 Integración del stack de baterías de litio

Cuando comenzó la realización del presente proyecto, el stack de baterías de litio y su convertidor DC/DC asociado ya estaban instalados y se encontraban operativos. No obstante, para completar la integración de este sistema de almacenamiento, era necesario instalar el módulo EMS de Elite Power Solutions, para poder monitorizar desde el FLC el estado, las medidas de magnitudes y los flags de *warning* y de error del stack de baterías de litio.

Por otra parte, era necesario también desarrollar un código de programa en Unity Pro para la monitorización remota del módulo EMS desde el FLC, y a partir de dicho programa implementar un bloque de pretratamiento que pudiera ser utilizado en la programación del primer nivel de control.

Para completar la integración del stack de baterías de litio en la Microrred, se realizaron las siguientes acciones:

- Montaje de una resistencia de shunt para la medida de la intensidad del stack (Figura 46).
- Montaje del módulo EMS junto al stack (Figura 47). Cableado del módulo a una fuente de alimentación de 12 V. Cableado de las bornas de salida del stack al módulo EMS para la medida de la tensión del stack. Cableado de la resistencia de shunt al módulo EMS para la medida de la intensidad del stack.
- Cableado de la interfaz CAN del módulo EMS a la pasarela ADFweb CAN/CANopen, la misma a la que se cableó también la interfaz CAN de la pila de hidrógeno NEXA 1200.
- Configuración de la pasarela CAN/CANopen, para la definición de la PDO de recepción y del empaquetamiento en la misma de la trama CAN recibida desde el módulo EMS.
- Creación de un proyecto de pruebas en Unity Pro para comprobar la comunicación entre el módulo EMS y el FLC. En el mismo programa, también se ha desarrollado toda la programación relativa al procesado y acondicionamiento de las tramas recibidas, que contienen la información empaquetada en el formato del protocolo propietario *Broadcaster V3.1*.
- Definición de condiciones de error en el stack adicionales a las que contempla el FEC del módulo EMS. Dichas condiciones de error son las siguientes:
 - Que la tensión en alguna de las celdas del stack supere cierto valor máximo.
 - Que la tensión en alguna de las celdas del stack disminuya por debajo de cierto valor mínimo.
 - Que el SOC del stack supere cierto valor máximo.
 - Que el SOC del stack descienda de cierto valor mínimo.
- Definición de condiciones de *warning* en el stack adicionales a las que contempla el FEC del módulo EMS. Dichas condiciones de *warning* son las siguientes:
 - Que la tensión en alguna de las celdas del stack supere cierto valor máximo inferior al límite para la condición de error.
 - Que la tensión en alguna de las celdas del stack disminuya por debajo de cierto valor mínimo superior al límite para la condición de error.
 - Que el SOC del stack supere cierto valor máximo inferior al límite para la condición de error.
 - Que el SOC del stack descienda de cierto valor mínimo superior al límite para la condición de error.
- Desarrollo de un bloque de pretratamiento en el entorno Unity Pro para la obtención de los estados, registros de flags y medidas de magnitudes del módulo EMS a partir del procesado y acondicionamiento de las tramas CANopen recibidas, y para la detección y notificación de las condiciones de error y de *warning* adicionales. Este bloque de programación específico para el módulo EMS ha sido desarrollado para ser incluido en un programa implementado según el modelo de jerarquía estructurada para programación de PLCs propuesto por el estándar abierto PLCOpen. Su especificación se describe de manera detallada en el apartado 4.5.2.

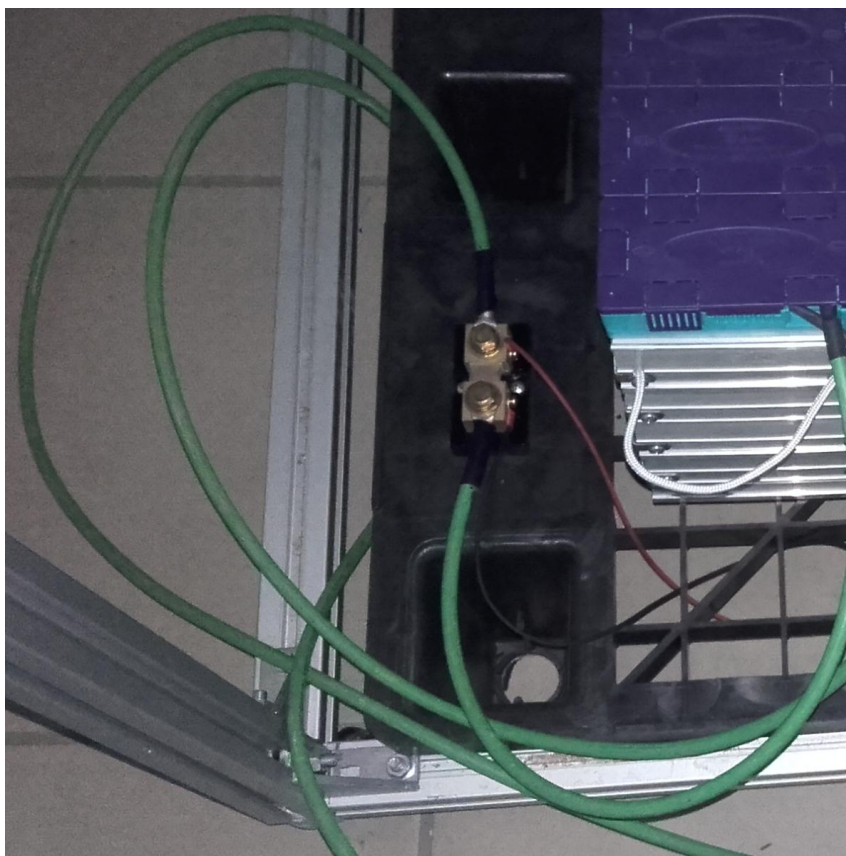


Figura 46. Resistencia de shunt para la medida de la intensidad del stack.

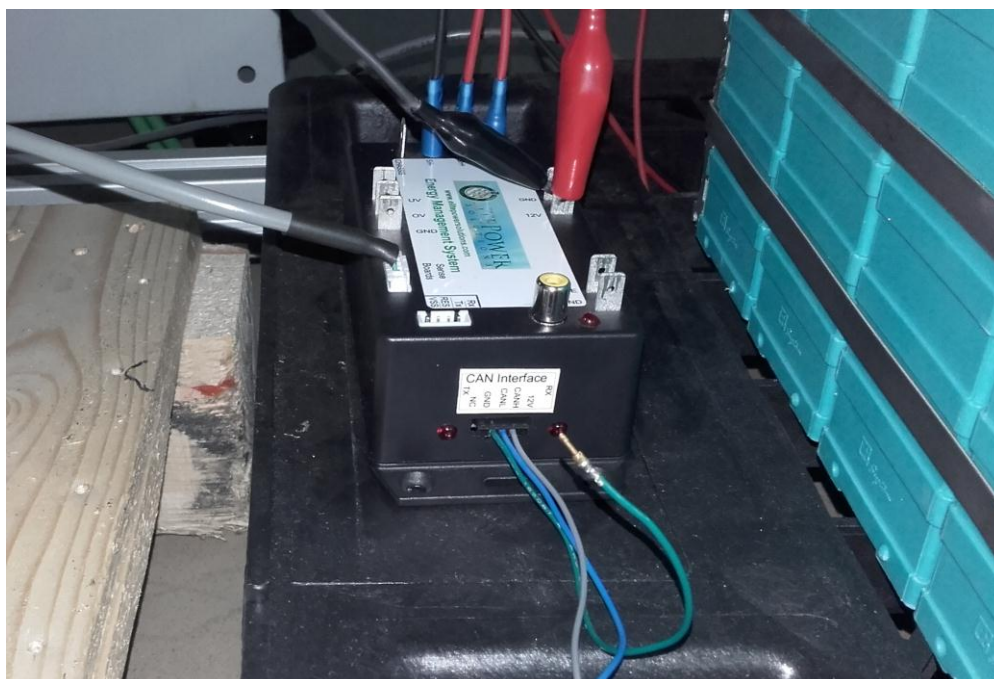


Figura 47. Montaje del módulo EMS de Elite Power junto al stack.

3.7 Integración del convertidor fotovoltaico Studer VarioString VS-70

Para completar la integración del sistema de generación fotovoltaico en la Microrred, era necesario implementar una comunicación para la monitorización y comando remotos del convertidor Studer VarioString VS-70 desde el FLC.

Como ya se ha descrito en el apartado 2.10.2, la comunicación entre el convertidor Studer VarioString VS-70 y el FLC se realiza a través del módulo accesorio de configuración y comando RCC-02, que emplea un protocolo de comunicaciones propietario bajo Ethernet denominado *Xtender Serial*, precisándose de un módulo Xcom-CAN que empaqueta el protocolo *Xtender Serial* en tramas CAN, y que estaría cableado a la misma pasarela CAN/CANopen a la cual se cablearon también la interfaces CAN de la pila de hidrógeno y del módulo EMS del stack de baterías de litio.

Por otra parte, era necesario también desarrollar un código de programa en Unity Pro para la monitorización y comando remotos del convertidor desde el FLC, y a partir de dicho programa implementar unos bloques de pretratamiento y comando que pudieran ser utilizados en la programación del primer nivel de control.

Para completar la integración del convertidor VarioString VS-70 en la Microrred se realizaron las siguientes acciones:

- Configuración y montaje del módulo Xcom-CAN (Figura 48).
- Cableado del módulo Xcom-CAN a la pasarela ADFweb CAN/CANopen.
- Configuración de la pasarela CAN/CANopen, para la definición de las PDOs de recepción y transmisión, y del empaquetamiento en las mismas de las tramas CAN transmitidas a y recibidas desde el módulo Xcom-CAN.
- Creación de un proyecto de pruebas en Unity Pro para comprobar la comunicación entre el convertidor y el FLC. En el mismo programa, también se ha desarrollado toda la programación relativa al procesado y acondicionamiento de las tramas recibidas, que contienen la información empaquetada en el formato del protocolo propietario *Xtender Serial*. También, se ha implementado aquí la generación de las tramas correspondientes a los comandos de encendido y apagado del convertidor.
- Desarrollo de un bloque de pretratamiento en el entorno Unity Pro para la obtención de los estados y las medidas de magnitudes del convertidor VarioString VS-70 a partir del procesado y acondicionamiento de las tramas CANopen recibidas.
- Desarrollo de un bloque de control en el entorno Unity Pro para la generación de las tramas CANopen necesarias para los comandos de encendido y apagado del convertidor VarioString VS-70, conteniendo los códigos que se indican en la especificación del protocolo propietario *Xtender Serial*.

Los bloques de pretratamiento y de control han sido desarrollados para ser incluidos en un programa implementado según el modelo de jerarquía estructurada para programación de PLCs propuesto por el estándar abierto PLCOpen. Sus especificaciones se describen de manera detallada en el apartado 4.5.1.

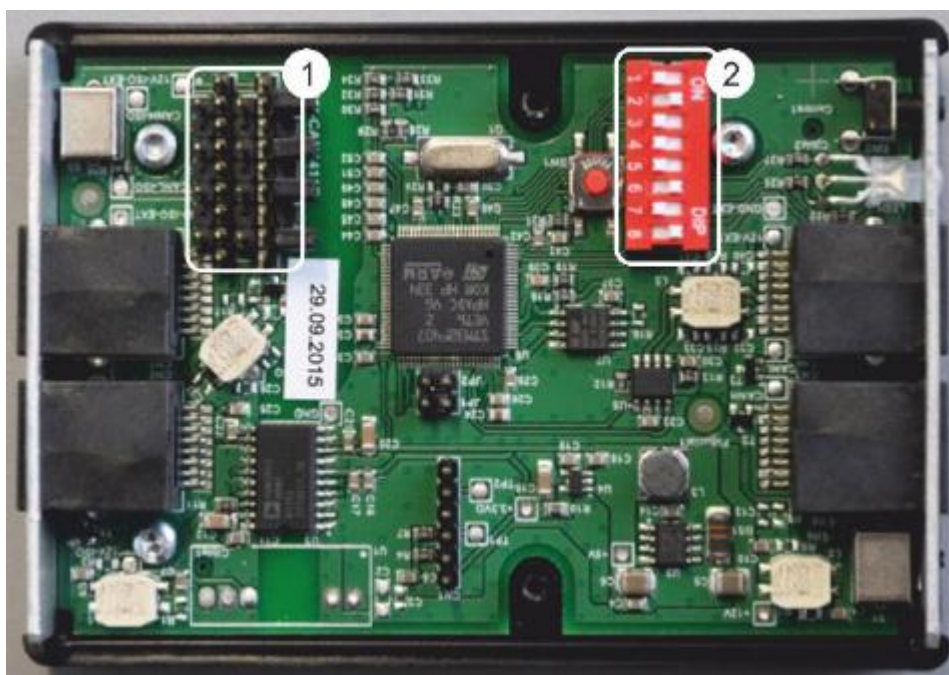


Figura 48. Módulo Xcom-CAN. Array de *jumpers* (1) para la configuración de los pines de la interfaz CAN y *switches* (2) para la selección del protocolo de comunicaciones y modelo de batería.

4 PROGRAMACIÓN DEL *FIRST LEVEL CONTROLLER*

4.1 Introducción. Especificación de las funcionalidades requeridas para el FLC.

El objetivo de este capítulo es exponer y ofrecer una descripción de todos los aspectos relacionados con la programación del *First Level Controller* para la implementación del conjunto de funcionalidades que se han especificado para el Primer Nivel de Control de la Microrred.

En un primer planteamiento, para la programación del *First Level Controller* se abordó la opción de emplear el programa del PLC de la antigua Microrred, debidamente modificado para la inclusión de la monitorización y comando remotos de los nuevos equipos. Sin embargo, dado el elevado grado de dedicación de su código, y debido también a la necesidad de implementar un nuevo esquema de modos de operación, esta solución resultaba insuficiente y hubo de ser desestimada.

Era necesario, por tanto, desarrollar un nuevo programa para el *First Level Controller*, y su implementación tenía que estar basada en el empleo de modelos o técnicas de programación de jerarquía estructurada, con el objetivo, en primer lugar, de conseguir una solución con una codificación fácilmente mantenible y modificable, para reducir los errores de depuración y agilizar la integración de futuros equipos y nuevas funcionalidades, y en segundo lugar para que el código sea más comprensible para cualquier técnico que trabaje con la Microrred ahora o en el futuro. La solución que se ha adoptado está basada en la metodología GEMMA y en el modelo de programación de jerarquía estructurada propuesto por PLCopen, que serán descritos en los próximos apartados.

Las funcionalidades requeridas para el *First Level Controller*, y que habrán de ser implementadas en su nuevo programa, son las siguientes:

- Lectura de los datos contenidos registros Modbus del electrolizador (EZ) y del convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (CLI), y procesamiento de los mismos para la obtención de los códigos de estados, medidas de magnitudes y flags de errores y *warnings* de ambos equipos.
- Lectura de los datos contenidos en las tramas CAN transmitidas por la pila de hidrógeno (FC), su convertidor DC/DC asociado (CFC), el módulo EMS del stack de baterías de litio (LI) y el convertidor DC/DC del campo fotovoltaico (CPH). Estos datos son recibidos por el FLC empaquetados en mensajes CANopen, y tienen que ser procesados para obtener los códigos de estados, medidas de magnitudes y flags de errores y *warnings* de dichos equipos.
- Acondicionamiento de las señales analógicas procedentes de la fuente de alimentación (PS) y de la carga electrónica (DCL) programables para la obtención de las medidas de tensión e intensidad en los buses de salida de dichos equipos.
- Acondicionamiento de las señales analógicas procedentes de los sensores de temperatura, presión y caudal de los circuitos de hidrógeno y de agua.
- Detección del estado de una seta de emergencia.
- Generación de mensajes de escritura Modbus para el envío de comandos y consignas al electrolizador (EZ) y al convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (CLI).
- Generación de tramas CANopen para el envío de comandos y consignas a la pila de hidrógeno (FC), a su convertidor DC/DC asociado (CFC), y al convertidor DC/DC del campo fotovoltaico (CPH). Las pasarelas CAN/CANopen toman los campos de datos de estas tramas y los empaquetan en las tramas CAN que son finalmente enviadas a dichos equipos.
- Conversión de las consignas de tensión e intensidad para la fuente de alimentación programable (PS) en señales analógicas de tensión de 0 a 10 V.

- Conversión de la consigna de potencia para la carga electrónica programable (DCL) en una señal analógica de tensión de 0 a 10 V.
- Comando de las electroválvulas de los circuitos de hidrógeno (FY01, FY02, FY03, FY04) y de agua (FY05 y FY06).
- Comando de la bomba de agua caliente del circuito de agua. El relé para la activación de esta bomba está cableado en paralelo con el solenoide de la electroválvula FY05.
- Inclusión de un modelo matemático para la estimación del SOC del stack de baterías de plomo-ácido (PB).
- Inclusión de un modelo matemático para la estimación del nivel de carga de los tanques de hidruros metálicos.
- Inclusión de un control por histéresis para la presión en el buffer de salida del electrolizador (EZ).
- Inclusión de un control por histéresis para la presión a la salida de los tanques de hidruros metálicos durante el proceso de descarga de hidrógeno.
- Detección y notificación de condiciones de error y fallo de la instalación.
- Gestión de los diferentes modos de operación que se han definido para la Microrred.
- Habilitación o deshabilitación de los equipos y sistemas de la Microrred, para conseguir diferentes topologías y configuraciones.

4.2 Definición de los modos de operación de la Microrred

En Ingeniería de Control, el **Modo de Operación**, o Modo Funcional, es un concepto que se emplea para describir el comportamiento o situación de una planta o instalación automatizada, en términos de permanencia en un determinado estado estable, como pueden ser los estados de parada, de *standby* o de emergencia, o en términos de ejecución de un determinado proceso o secuencia de acciones, como pueden ser el proceso de arranque de la planta o los modos de funcionamiento manual y automático. Una instalación automatizada alcanzará un determinado modo de operación como consecuencia de la ocurrencia de eventos que pueden ser generados por el proceso que se esté ejecutando, por acciones del operador de la planta, por situaciones anómalas que puedan causar daños a la producción o a la instalación, o por comandos provenientes de un nivel superior en la jerarquía de control.

La **guía GEMMA** (*Guide d'Etude des Modes de Marches et d'Arrêts*) es una herramienta gráfica que ofrece una visión estructurada de todos los modos de operación que puede presentar un automatismo (Figura 49). Fue desarrollada por la ADEPA (*Agence nationale pour le DÉveloppement de la Productique Appliquée à l'industrie*) para ofrecer una metodología que permitiese una definición sistemática de los modos de operación de una planta automatizada, y de las condiciones de evolución entre ellos. A pesar de ser una metodología originalmente orientada a la automatización de procesos de fabricación industriales, es nuestro caso ha sido tomada como base para definir los diferentes modos de operación de la Microrred que habrán de ser implementados en el Primer Nivel de Control.

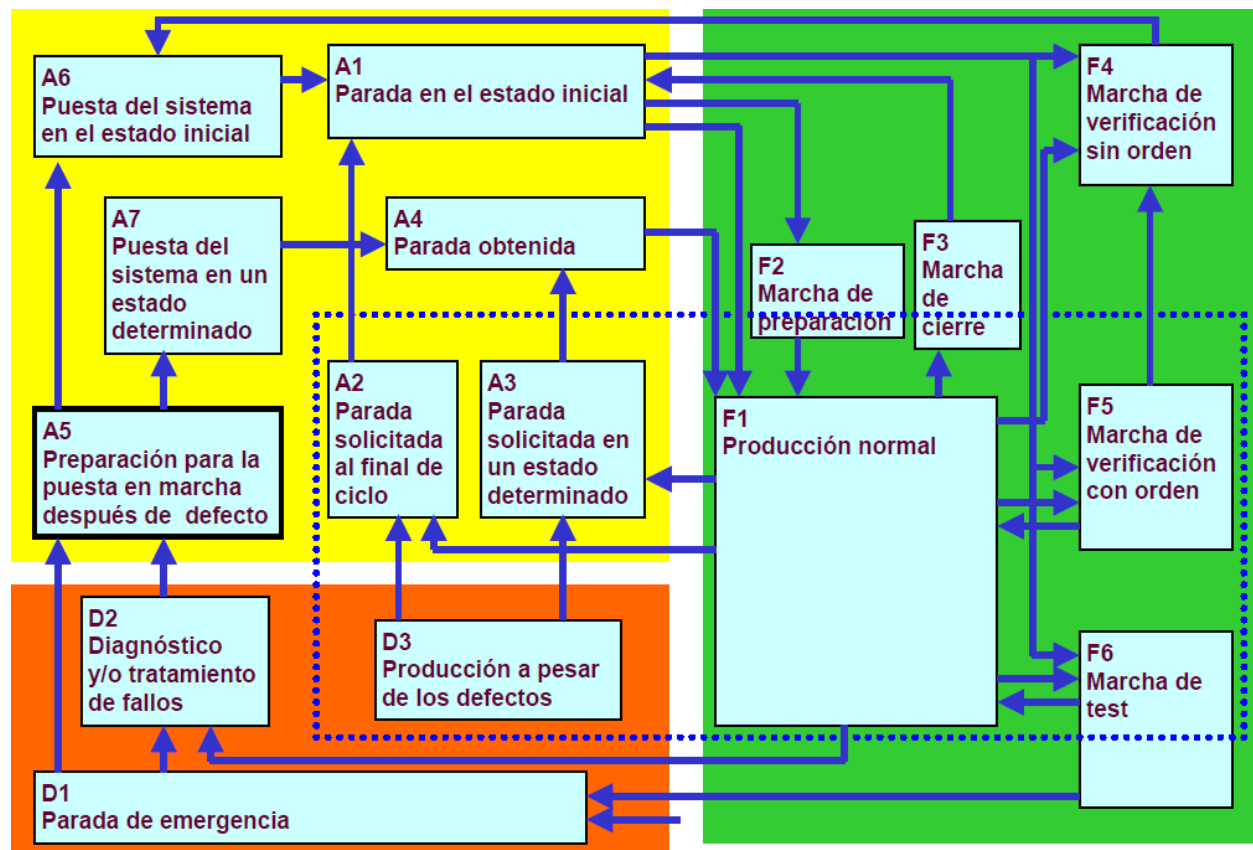


Figura 49. Guía GEMMA, extraída de [42].

Los Modos de Operación que se han definido para la Microrred son los siguientes:

- **A1 Stop. Estado de parada de la Microrred.** Es un estado estable sin acciones de control asociadas, en el cual los equipos de la Microrred pueden estar operativos o apagados. Es el estado en el que se sitúa inicialmente la Microrred cuando se arranca el FLC.
- **F2 Starting Process. Proceso para la puesta en marcha de la Microrred.** Es la secuencia de acciones necesaria para conducir la Microrred a los modos de funcionamiento manual y remoto, que son descritos a continuación. Se realiza una inertización con nitrógeno del circuito de hidrógeno, y se comprueba que todos los equipos habilitados de la Microrred están operativos.
- **F1.0 Standby. Estado de reposo de la Microrred.** Al igual que A1 Stop, es un estado estable sin acciones de control asociadas, pero en este caso los equipos habilitados de la Microrred estarán operativos y preparados para su arranque. Es una etapa previa a los modos de funcionamiento manual y remoto.
- **F1.1 Remote Function. Modo de funcionamiento remoto de la Microrred.** En él, el FLC recibe consignas de potencia para los equipos de la Microrred desde el Segundo Nivel de Control, generadas por el algoritmo o la estrategia de control que esté ejecutándose en el SLC.

Cuando se recibe una consigna de potencia no nula para el electrolizador (EZ) o para el convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (CLI), el FLC primero envía una orden de arranque, y una vez arrancado el equipo le envía el valor de consigna.

Cuando se recibe una consigna de potencia no nula para el convertidor DC/DC asociado a la pila de hidrógeno (CFC), primero se abren las electroválvulas FY02 y FY04 para permitir el paso del hidrógeno de los tanques de hidruros metálicos a la pila de hidrógeno. A continuación se abre la válvula FY05 para la inyección de agua caliente en los tanques para realizar la descarga. Después, se envía una orden de arranque a la pila de hidrógeno (FC). Una vez la pila de hidrógeno se encuentra en el estado Running, se envía una orden de arranque a su convertidor DC/DC asociado (CFC), y una vez se encuentra en el estado *Running Power Mode* se le envía la el valor de consigna, con una pendiente de 100 W/s.

Las consignas para la fuente de alimentación (PS) y la carga electrónica (DCL) programables son enviadas directamente a los dispositivos, ya que carecen de comandos de encendido y apagado.

El convertidor asociado al campo de paneles fotovoltaicos (CPH) sólo recibe órdenes de encendido y apagado.

Cuando se reciben consignas de potencia nulas, se realiza la secuencia inversa. En el caso del electrolizador (EZ) y del convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (CLI), primero se le envía el valor de consigna cero y después la orden de apagado. En el caso de la pila de hidrógeno (FC) y su convertidor DC/DC asociado (CFC), primero se envía la consigna cero al convertidor, luego la orden de apagado, después la orden de apagado para la pila, y por último se cierra la electroválvula FY05 para cortar la inyección de agua caliente en los tanques de hidruros, y luego las electroválvulas FY02 y FY04 para cortar el suministro de hidrógeno a la pila.

- **F1.2 Manual Function. Modo de funcionamiento manual de la Microrred.** En él, los equipos y sistemas de la Microrred son comandados por un operador a través del HMI del FLC en el entorno *Unity Pro*, o a través del HMI del SCADA que se planea desarrollar con la plataforma *Vijeo Citect* en un futuro próximo.
- **F3 Stopping Process. Proceso de parada de la Microrred.** Secuencia de operaciones necesarias para conducir la Microrred al estado A1 Stop. A cada equipo habilitado de la Microrred se le pone su consigna a cero, y se le envía una orden de apagado.
- **D1.0 Emergency Stop Sequence. Parada de emergencia de la Microrred.** Secuencia de operaciones necesarias para conducir la Microrred a un estado de parada segura cuando se da una condición de error.
- **D1.1 Emergency State. Estado de emergencia de la Microrred.** Es un estado estable en el cual todas las acciones de control de la Microrred permanecen inhibidas. La Microrred permanece de

forma indefinida en este estado hasta que el operador activa una señal para el reconocimiento del estado de emergencia; entonces la Microrred será conducida al modo de diagnóstico y tratamiento de errores que se describe a continuación.

- **D1.2 Diagnosis. Modo de diagnóstico y tratamiento de errores de la Microrred.** Este modo de funcionamiento permite el análisis de las causas de la condición o condiciones de error que han llevado a la Microrred al estado de emergencia, mediante la ejecución de acciones manuales sobre los equipos y sistemas de la Microrred. También permite el envío de órdenes de rearme a los equipos, en caso de que la condición de error venga dada por un determinado equipo que se encuentre en estado de error. Equivale a un modo de funcionamiento manual dentro de la secuencia de emergencia de la planta.

Las condiciones de transición entre los modos de operación que se han definido para la Microrred son las siguientes:

- Desde el estado de parada **A1 Stop** la Microrred es conducida a **F2 Starting Process** cuando el operador solicita la puesta en marcha de la Microrred mediante la puesta a uno de una variable binaria que se ha denominado **Start**.
- Cuando finaliza la secuencia de **F2 Starting Process**, lo cual se indica mediante la puesta a uno de una variable binaria que se ha denominado **F2_End**, la Microrred evoluciona hacia el estado de reposo **F1.0 Standby**.
- Desde el estado de reposo **F1.0 Standby** la Microrred es conducida a **F1.1 Remote Function** cuando el operador solicita la ejecución del modo de funcionamiento remoto mediante la puesta a uno de una variable binaria que se ha denominado **Sel_RF** (*Selection of Remote Function*).
- Desde el modo de funcionamiento remoto **F1.1 Remote Function** la Microrred es conducida a **F1.0 Standby** cuando el operador solicita la puesta en estado de reposo de la Microrred mediante la puesta a cero de la variable binaria **Sel_RF**.
- Desde el estado de reposo **F1.0 Standby** la Microrred es conducida a **F1.2 Manual Function** cuando el operador solicita la ejecución del modo de funcionamiento manual mediante la puesta a uno de una variable binaria que se ha denominado **Sel_MF** (*Selection of Manual Function*).
- Desde el modo de funcionamiento manual **F1.2 Manual Function** la Microrred es conducida a **F1.0 Standby** cuando el operador solicita la puesta en estado de reposo de la Microrred mediante la puesta a cero de la variable binaria **Sel_MF**.
- Desde el estado de reposo **F1.0 Standby** la Microrred es conducida a **F3 Stopping Process** cuando el operador solicita la parada de la Microrred mediante la puesta a uno de una variable binaria que se ha denominado **Stop**.
- Desde el modo de funcionamiento remoto **F1.1 Remote Function** la Microrred es conducida a **F3 Stopping Process** cuando el operador solicita la parada de la Microrred mediante la puesta a uno de una variable binaria que se ha denominado **Stop**.
- Desde el modo de funcionamiento manual **F1.2 Manual Function** la Microrred es conducida a **F3 Stopping Process** cuando el operador solicita la parada de la Microrred mediante la puesta a uno de una variable binaria que se ha denominado **Stop**.
- Cuando finaliza la secuencia de **F3 Stopping Process**, lo cual se indica mediante la puesta a uno de una variable binaria que se ha denominado **F3_End**, la Microrred evoluciona hacia el estado de parada **A1 Stop**.
- Cuando se produce una condición de error, lo cual es notificado mediante la puesta a uno de una variable binaria denominada **Error**, a despecho del modo de operación activo la Microrred es conducida a **D1.0 Emergency Stop Sequence**, para ejecutar la secuencia de puesta en emergencia.
- Cuando finaliza la secuencia de **D1.0 Emergency Stop Sequence**, lo cual se indica mediante la puesta a uno de una variable binaria que se ha denominado **D1.0_End**, o cuando el tiempo que tarda en

ejecutarse la secuencia **D1.0 Emergency Stop Sequence** supera cierto valor límite, la Microrred es conducida al estado de emergencia **D1.1 Emergency State**.

- Cuando el operador reconoce el estado de emergencia de la Microrred, lo cual es indicado mediante la puesta a uno de una variable binaria que se ha denominado **Ack** (*Acknowledgement*), la Microrred es conducida al modo de diagnóstico y tratamiento de errores **D1.2 Diagnosis**.
- Cuando desaparece la condición de error, lo cual se indica mediante la puesta a cero de la variable binaria **Error**, la Microrred es conducida al estado de parada **A1 Stop**.

Las variables binarias **Start**, **Stop**, **Sel_RF**, **Sel_MF** y **Ack** pueden ser manipulada por el operador a través del HMI del FLC.

Las condiciones de error que pueden darse en la Microrred, y que pueden poner a 1 la variable binaria **Error**, se enumeran en el apartado siguiente.

En la Figura 50, se muestra un representación gráfica de los modos de operación de la Microrred, y las condiciones de transición entre ellos.

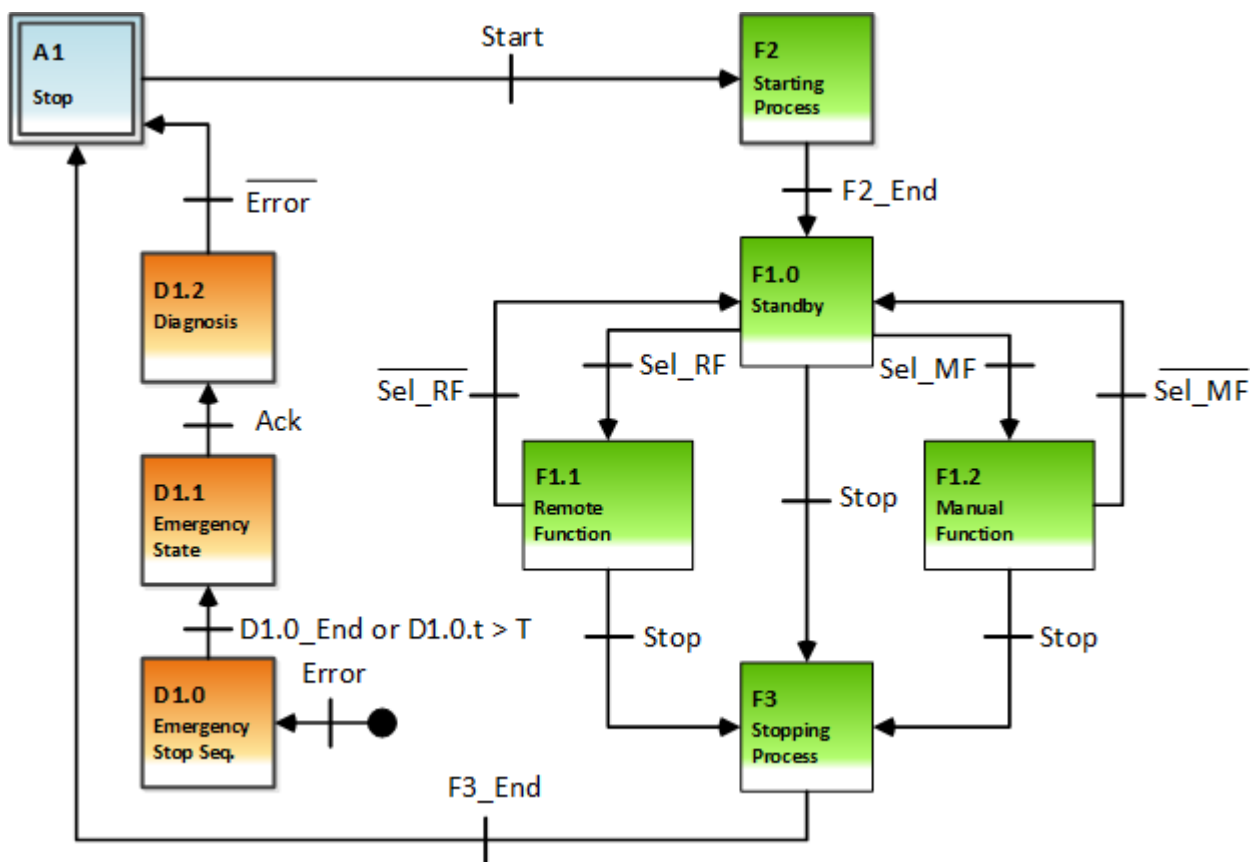


Figura 50. Modos de operación de la Microrred. Condiciones de transición.

4.3 Especificación de las condiciones de error de la Microrred

Existen determinadas situaciones anómalas de fallo, o condiciones de error, que pueden producirse en la Microrred, y que en caso de que ocurran harán necesario que la Microrred sea conducida a un estado de parada seguro con el fin de evitar daños a las personas y a los equipos.

Era necesario realizar un análisis de todas las condiciones de error que podrían darse en la Microrred, e incluir en la programación del FLC los códigos necesarios para su detección y para activar la transición de la Microrred hacia la secuencia de puesta en emergencia.

Las condiciones de error que se han definido para la Microrred son las siguientes:

- Que la tensión en el stack de baterías de plomo (PB) supere los 56 V.
- Que la tensión en el stack de baterías de plomo (PB) descienda de los 44 V.
- Que el SOC del stack de baterías de plomo (PB) supere el 70.0 %.
- Que el SOC del stack de baterías de plomo (PB) descienda del 40.0 %.
- Que la tensión de celda en el stack de baterías de litio (Li) supere los 4.5 V.
- Que la tensión de celda en el stack de baterías de litio (Li) descienda de los 2.5 V.
- Que el SOC del stack de baterías de litio (Li) supere el 95 %.
- Que el SOC del stack de baterías de litio (Li) descienda del 40 %.
- Que el módulo EMS del stack de baterías de litio (Li) indique estado de error, debido a las siguientes causas:
 - Fallo por detección de derivación.
 - Fallo por error en la comunicación con los BMSs de las celdas.
 - Fallo por sobretemperatura en alguna de las celdas.
 - Fallo interno del módulo EMS.
 - Fallo por tensión en el stack demasiado elevada, según límite no especificado por el fabricante.
 - Fallo por intensidad del stack demasiado elevada, según límite no especificado por el fabricante.
- Que el convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (CLI) se encuentre en estado de error.
- Que el electrolizador (EZ) se encuentre en estado de error.
- Que la pila de hidrógeno (FC) se encuentre en estado de error.
- Que el convertidor DC/DC asociado a la pila de hidrógeno (CFC) se encuentre en estado de error.
- Que se detecte en el circuito de hidrógeno una presión superior a los 5.0 barg.
- Durante más de 5 segundos. Esta condición de error puede darse si falla el limitador de presión del circuito de hidrógeno.
- Que se detecte una fuga en el circuito de hidrógeno. Esta condición de error se infiere a partir de la medida del caudal y del estado de las electroválvulas en el circuito de hidrógeno. Si durante más de 10 segundos la medida de caudal es mayor a 6.0 NI/minuto y la electroválvula FY02 está cerrada, entonces se considera que se está produciendo una fuga de hidrógeno.
- Que el caudal de hidrógeno hacia la pila sea mayor a 50.0 NI/minuto durante más de 5 segundos.
- Que se produzca una obstrucción en el circuito de agua. Esta condición de error se infiere a partir de la medida del caudal y del estado de las electroválvulas en el circuito de agua. Si durante más de 10 segundos la medida del caudal de agua es menor a 0.1 L/s y está abierta la electroválvula FY05 o la

electroválvula FY06, entonces se considera que se ha producido una obstrucción.

- Que se detecte una fuga en el circuito de agua. Esta condición de error se infiere a partir de la medida del caudal y del estado de las electroválvulas en el circuito de agua. Si durante más de 10 segundos la medida del caudal de agua es mayor a 20 L/s y están cerradas las electroválvulas FY05 y FY06, entonces se considera que se ha producido una fuga en el circuito de agua.
- Que el caudal en el circuito de agua sea mayor a 20 L/s durante más de 10 segundos.
- Que la tensión en el bus principal de la Microrred supere los 56.0 V.
- Que la tensión en el bus principal de la Microrred descienda de los 44.0 V.
- Que se accione la seta de emergencia de la Microrred.
- Que el proceso para la puesta en marcha de la Microrred (*F2 Starting Process*) exceda un tiempo de *timeout* fijado en 100 s.
- Que el proceso de parada de la Microrred (*F3 Stopping Process*) exceda un tiempo de *timeout* fijado en 100 s.
- Que se produzca un error en la comunicación Modbus durante más de 5 segundos.
- Que el PLC indique estado de error en alguna de sus entradas analógicas durante más de un segundo.

4.4 Desarrollo del programa del FLC en Unity Pro. Estructura y organización. Modelo PLCopen.

Para el desarrollo de la programación del *First Level Controller*, que como ya se ha mencionado anteriormente es un PLC Modicon M340, se ha optado por emplear una estructura basada en el modelo de programación estructurada propuesto por la organización PLCopen (www.plcopen.org).

Con la finalidad de hacer más comprensible el código y aportarle un mayor grado de mantenibilidad, ampliabilidad y reusabilidad, y de esta manera reducir tiempos de depuración y desarrollo, en el modelo de programación estructurada de PLCopen se plantea el uso de tres tipos de POU's (*Program Organization Unit*) o bloques de programa: **bloques de pretratamiento para los sensores**, **bloques de control para actuadores**, y un **bloque de control para la secuencia principal**.

En el caso de la automatización de un proceso industrial, los **bloques de control de actuadores** estarían asociados a **aquellos actuadores del proceso que requieran de cierta inteligencia**, como puede ser, por ejemplo, el caso del control de una válvula motorizada, un sistema de bombas alternantes, o cilindros neumáticos. Si el actuador fuese un indicador luminoso o una electroválvula de simple efecto no tendría sentido el uso de este tipo de bloques.

Respecto a los **bloques de pretratamiento para los sensores**, a veces son necesarios para **convertir la señal captada por el sensor en una determinada magnitud física, o para detectar fallos de funcionamiento**. Un buen ejemplo sería un sensor volumétrico de paletas que proporcione al PLC una señal por pulsos; podría disponerse de un bloque de pretratamiento que convirtiese estos pulsos en una medida de caudal.

El bloque de control para la secuencia principal implementa el conjunto de modos de operación del proceso automatizado. Capta las magnitudes acondicionadas o las señales binarias o códigos de estado producidos por los bloques de pretratamiento, y generando a partir de los mismos, y dependiendo del modo de operación activo, los comandos y valores de setpoint para los bloques de control de actuadores. PLCopen especifica que este bloque tiene que ser programado en lenguaje SFC. La implementación del comportamiento GEMMA visto anteriormente se realiza en este bloque.

A modo de ejemplo, en la Figura 52 se muestra la implementación de un programa para el proceso de fermentación representado en la Figura 51 siguiendo el modelo de programación estructurada de PLCopen. Se tiene un tanque que puede ser llenado con un líquido, mediante el accionamiento de una válvula de alimentación. El líquido puede ser calentado mediante una banda calentadora, o enfriado por convección. Pueden añadirse al líquido reactivos alcalinos o ácidos, y se dispone de un agitador para realizar la mezcla. Se tienen sensores para medir la temperatura y el pH de la mezcla. Por último, la mezcla puede ser evacuada del tanque mediante una válvula de vaciado.

Siguiendo el modelo de programación estructurada de PLCopen, se ha definido un único bloque de pretratamiento (E), para el caudalímetro situado en el conducto de alimentación del tanque. En el caso de los sensores para la medida de la temperatura y del pH de la mezcla, no era necesario implementar bloques de pretratamiento. Por otro lado, se han definido cuatro bloques de control de actuadores (B), que están asociados al calentador, a las válvulas de alimentación y vaciado del tanque, al agitador y a las válvulas para la inyección de reactivos. El bloque de control para el calentador recibe un valor de *setpoint* y una realimentación para la temperatura de la mezcla; podría implementar en su interior desde una simple máquina de estados hasta un controlador heurístico o un lazo PID; lo mismo ocurre con los otros bloques de control para el agitador y las válvulas de reactivos. El bloque de control para la secuencia principal (C) contiene un código escrito en SFC que gestiona la activación de los diferentes modos de operación de la planta. Obsérvese que las etapas de dicho código SFC corresponden exactamente a los modos de operación establecidos, e igual ocurre con las transiciones entre ellas. En este caso, se ha optado por implementar los modos de operación mediante dos bloques de programa específicos (D), que, o bien son llamados para su ejecución desde el SFC del bloque de control, o bien las acciones del SFC se emplean para activar variables binarias con las cuales se habilite su ejecución.

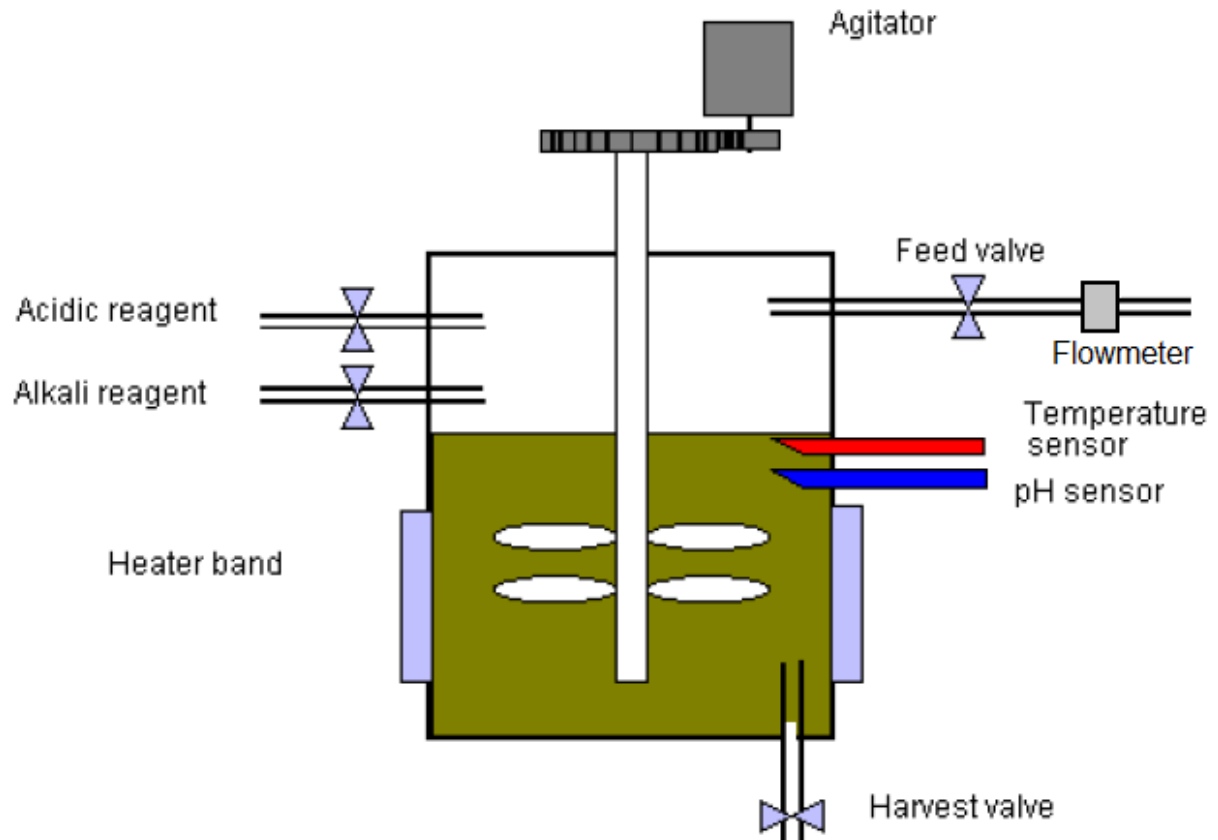


Figura 51. Representación de un proceso de fermentación, extraído de [43].

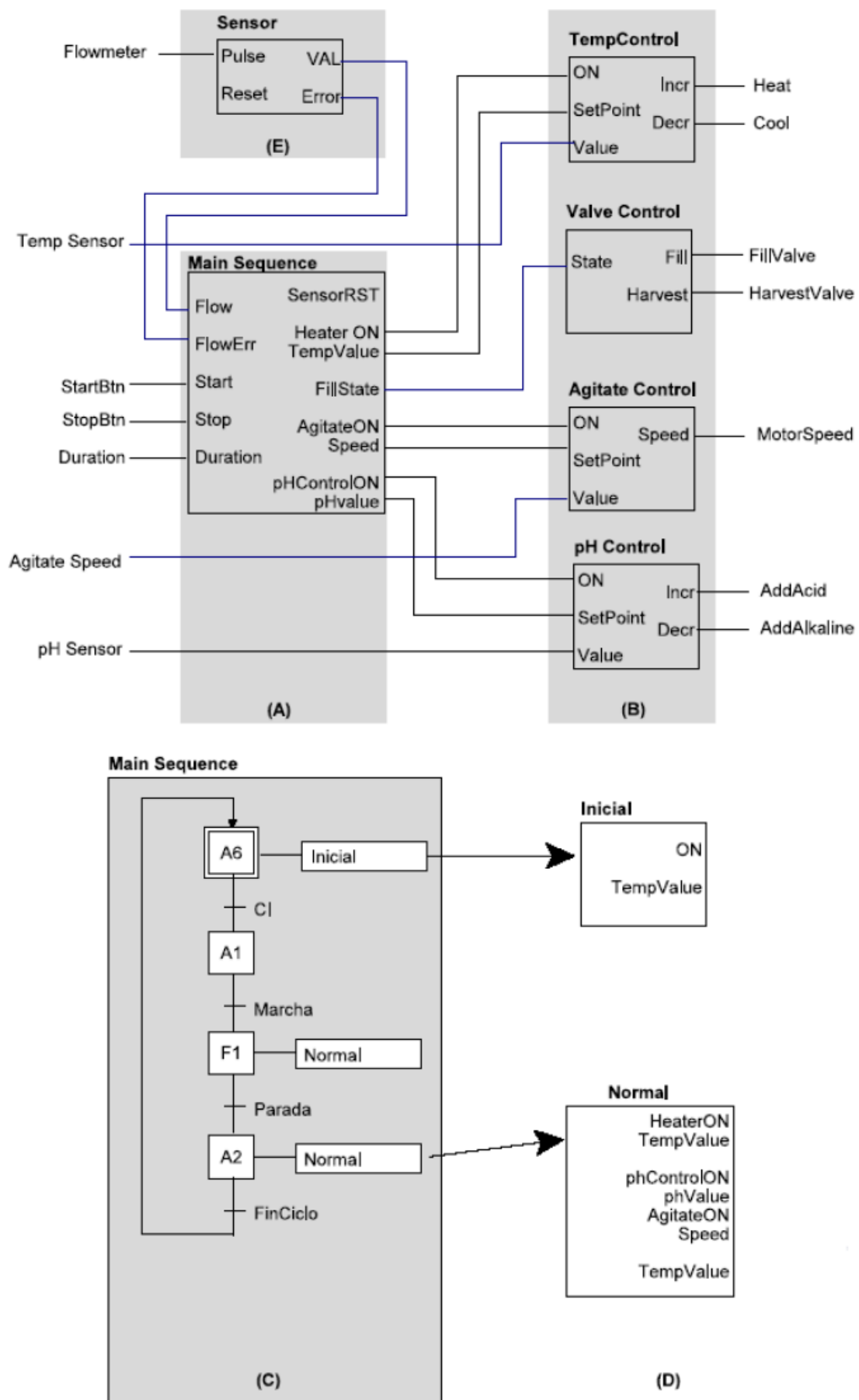


Figura 52. Implementación de la programación para el proceso de fermentación siguiendo el modelo de PLCopen.

En la particularización que se ha realizado del modelo de PLCopen para la programación del FLC de la Microrred, los bloques de pretratamiento de sensores, que en adelante será denominados **bloques de pretratamiento**, tienen las siguientes funciones:

- Acondicionamiento de las señales analógicas proporcionadas por los transductores de los circuitos de hidrógeno y de agua para la obtención de los valores medidos de temperaturas, presiones y caudales.
- Acondicionamiento de las señales analógicas proporcionadas por la fuente de alimentación y la carga electrónica programables, para la obtención de los valores de las medidas de tensión e intensidad en sus respectivas conexiones con el bus principal de la Microrred.
- Procesado de las tramas recibidas a través de Modbus y CANopen para la obtención de valores medidos, estados de funcionamiento, y flags de error o warning de los equipos que empleen dichos protocolos.
- Ejecución de modelos de estimación para la obtención de magnitudes no medibles, como es el caso del SOC del stack de baterías de plomo o del nivel de carga de los tanques de hidruros metálicos.

En cuanto a los bloques de control de actuadores, que en adelante serán denominados **bloques de control y comando**, sus funciones son las siguientes:

- Codificación de comandos y valores de consigna y empaquetado de los mismos en mensajes Modbus, o en mensajes CANopen, para su envío a los equipos que empleen dichos protocolos.
- Implementación de lazos de control a nivel de planta, como es el caso del control por histéresis para la presión en el buffer de salida del electrolizador (EZ), o del control por histéresis para la presión a la salida del tanque de hidruros metálicos durante el proceso de descarga.
- Comando de las electroválvulas de los circuitos de hidrógeno y de agua.

El bloque de control para la secuencia principal, que en adelante será denominado **bloque de gestión de modos de operación**, contiene un código en SFC para gestionar tanto la activación como las transiciones entre los diferentes modos de operación de la Microrred, que han sido implementado en bloques de programa específicos.

En la implementación del programa del FLC en *Unity Pro* se han empleado tres secciones (Figura 53). La primera sección, denominada *Main*, está programada en lenguaje *Ladder*, y contiene los bloques de pretratamiento y de control y comando, activos siempre, y también los bloques que implementan los modos de operación, cuya activación es controlada por el bloque de gestión de modos de operación.

La segunda sección, denominada OMM (*Operation Modes Management*) implementa el bloque de gestión de modos de operación, programado en lenguaje SFC (Figura 54).

Por último, la tercera sección, denominada CE_Detection (*Condition Error Detection*), contiene el código necesario para la detección y notificación de todas las condiciones de error que se han definido para la Microrred.

En los siguientes apartados, se describen de manera más detallada cada uno de los bloques que se han desarrollado para el programa del FLC.

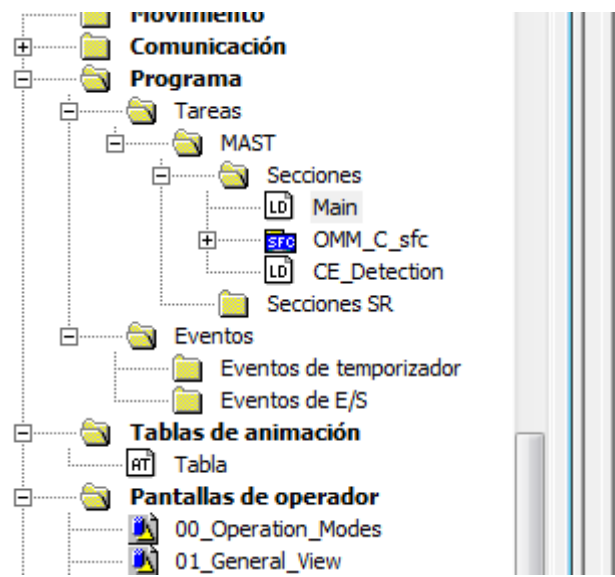


Figura 53. Secciones del programa del FLC en *Unity Pro*.

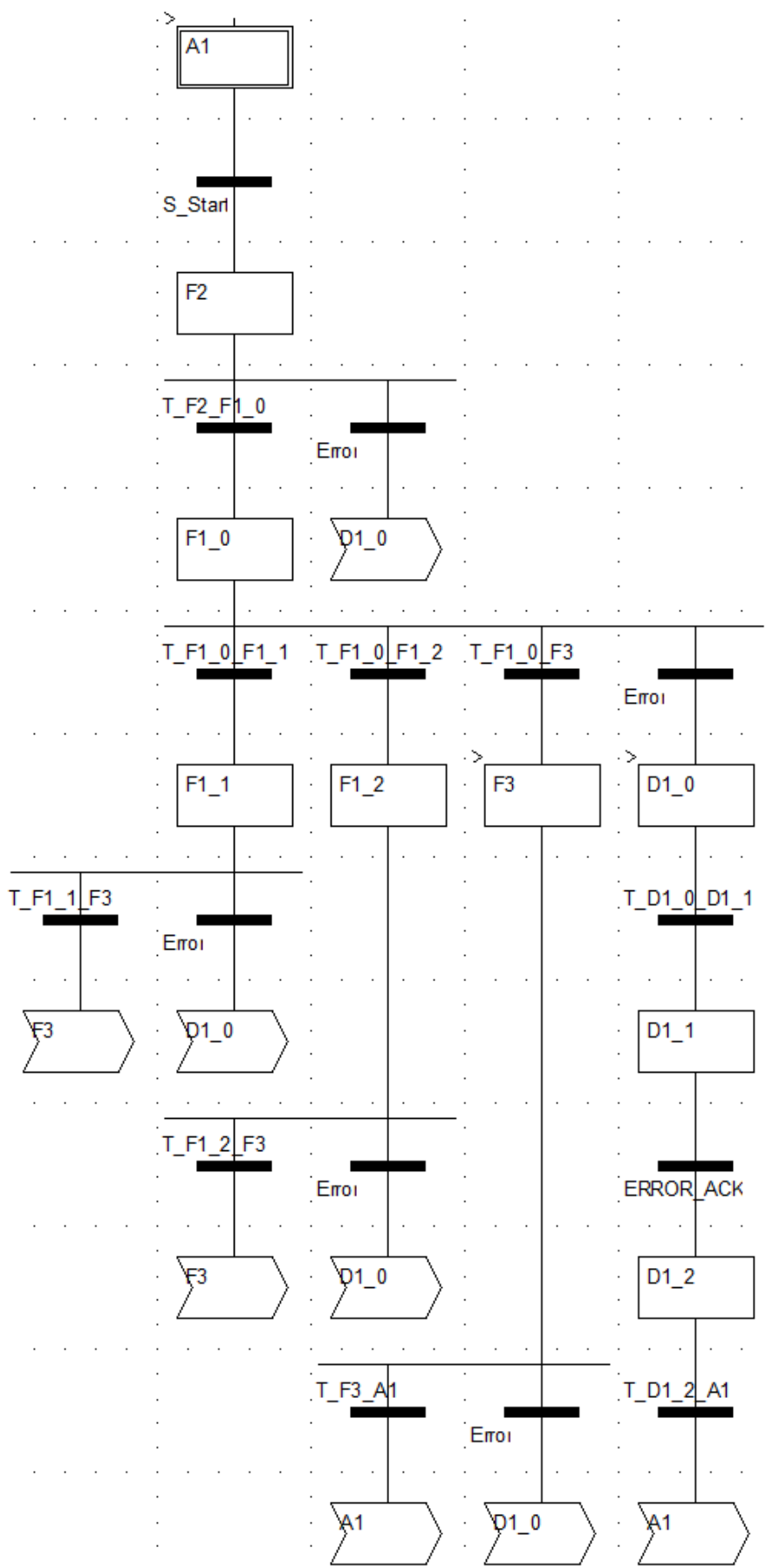


Figura 54. Código en SFC de la sección OMM.

4.5 Bloques de pretratamiento y comando para la programación del *First Level Controller*

4.5.1 Bloques de pretratamiento y comando para el convertidor DC/DC asociado al campo de paneles fotovoltaicos (CPH)

El bloque de pretratamiento para el convertidor DC/DC asociado al campo de paneles fotovoltaicos, denominado CPH_MC (*Converter-Photovoltaic Measurement and Conditioning*) se encarga de procesar los datos extraídos de las tramas CANopen recibidas desde el módulo de control remoto de dicho equipo, para obtener a partir de ellas los valores de las magnitudes medidas y el estado de funcionamiento del convertidor, que vendrán encapsulados en tramas del protocolo propietario *Xtender Serial* de Studer. Este bloque se encarga también de generar y enviar a través de CANopen las peticiones de lectura con el formato y la codificación especificada por *Xtender Serial* para que el módulo de control remoto del convertidor le envíe las tramas con las variables solicitadas. Este bloque ha sido programado en lenguaje *Ladder*, y tiene la interfaz que se muestra en la Figura 55. En la Tabla 14 se describen sus variables de entrada, en la Tabla 15 sus variables de salida, y en la Tabla 16 sus variables de entrada y salida. Las variables de salida se encuentran contenidas en dos estructuras, *Photovoltaic_Convert_CANopen_M* y *Photovoltaic_Convert_CANopen_SF* , creadas como tipos de datos derivados específicamente para esta POU.

Por otra parte, el bloque de comando y control, denominado CPH_CC (*Converter-Photovoltaic Command and Control*), se encarga de generar y enviar a través de CANopen las tramas *Xtender Serial* necesarias para encender o apagar el convertidor. Este bloque ha sido programado en lenguaje *Ladder*, y tiene la interfaz que se muestra en la Figura 56. En la Tabla 17 se describen sus variables de entrada, y en la Tabla 18 las de salida.

Para más información acerca de la codificación de las medidas de magnitudes y comandos en el protocolo *Xtender Serial*, así como también sobre su encapsulamiento en tramas CAN y CANopen, léase el apartado 7.1.7 del ANEXO 1: *Communication system*.

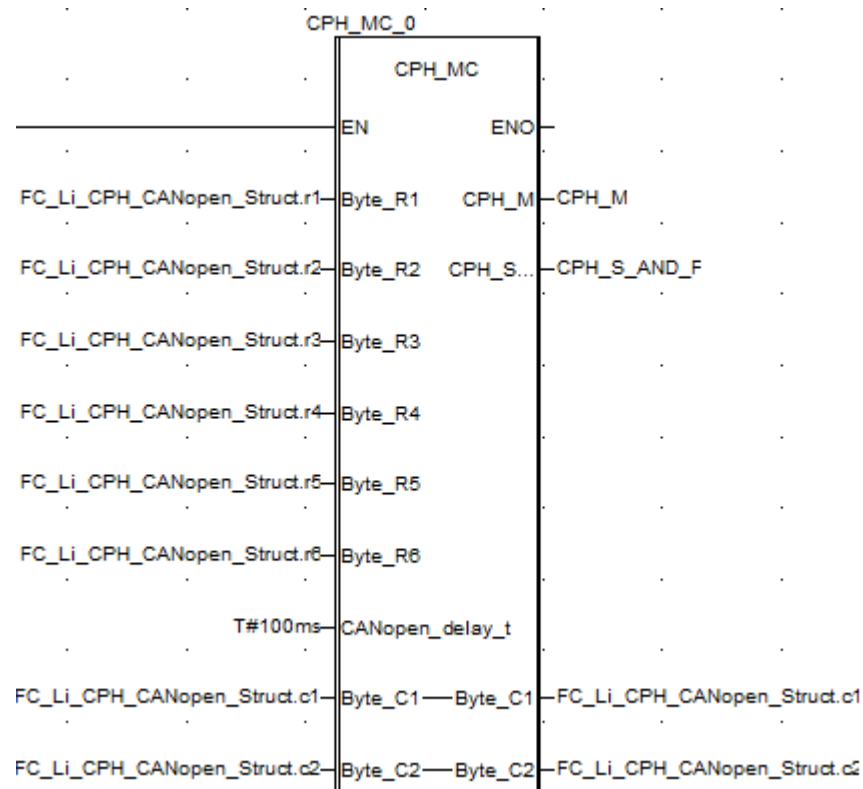


Figura 55. Interfaz del bloque de pretratamiento CPH_MC.

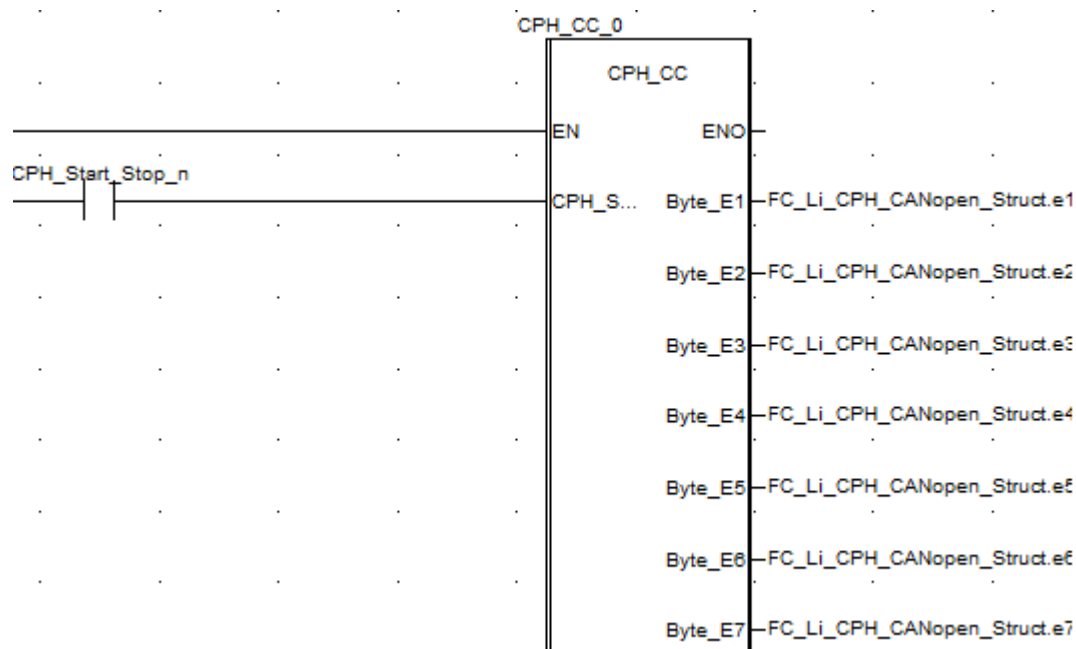


Figura 56. Interfaz del bloque de control y comando CPH_CC.

Tabla 14. Variables de entrada del bloque de pretratamiento CPH_MC.

CPH_MC Inputs		
Name	Type	Description
Byte_R1	Integer	CPH Info ID HB from CANopen
Byte_R2	Integer	CPH Info ID LB from CANopen
Byte_R3	Integer	CPH Value HB 1st byte from CANopen
Byte_R4	Integer	CPH Value 2nd byte from CANopen
Byte_R5	Integer	CPH Value 3rd byte from CANopen
Byte_R6	Integer	CPH Value LB 4th byte from CANopen
CANopen_delay_t	Time	CPH Delay for CANopen request and response

Tabla 15. Variables de salida del bloque de pretratamiento CPH_MC.

CPH_MC Outputs		
Name	Type	Description
CPH_M	Photovoltaic Convert CANopen M Struct	CPH Measurements
CPH_M.PH_Voltage_r	Real	CPH Photovoltaic field voltage (V)
CPH_M.PH_Current_r	Real	CPH Photovoltaic current (A)
CPH_M.PH_Power_r	Real	CPH Photovoltaic power (W)
CPH_M.Out_Bus_Voltage_r	Real	CPH Output bus voltage (V)
CPH_M.Out_Bus_Current_r	Real	CPH Output bus current (A)
CPH_M.Out_Bus_Power_r	Real	CPH Output bus power (W)
CPH_M.Perform_r	Real	CPH Perform (p.u)
CPH_M.PH_Max_Voltage_r	Real	CPH Photovoltaic field maximum voltage (V)
CPH_M.PH_Max_Power_r	Real	CPH Photovoltaic field maximum power (W)
CPH_M.Out_Bus_Max_Voltage_r	Real	CPH Output bus maximum voltage (V)
CPH_M.Out_Bus_Min_Voltage_r	Real	CPH Output bus minimum voltage (V)
CPH_M.Out_Bus_Max_Current_r	Real	CPH Output bus maximum current (A)
CPH_M.PH_Irr_Time_r	Real	CPH Photovoltaic field irradiation time of the current day (h)
CPH_M.PH_Energy_Ah_r	Real	CPH Photovoltaic field generated energy of the current day (Ah)
CPH_M.PH_Energy_kWh_r	Real	CPH Photovoltaic field generated energy of the current day (kWh)
CPH_M.PH_Total_Energy_MWh_r	Real	CPH Photovoltaic field total generated energy (MWh)
CPH_S_AND_F	Photovoltaic Convert CANopen SF Struct	CPH States and Flags
CPH_S_AND_F.System_Stanby	Bool	CPH Standby state
CPH_S_AND_F.System_Run	Bool	CPH Run state

Tabla 16. Variables de entrada y salida del bloque de pretratamiento CPH_MC.

CPH_MC Inputs & Outputs		
Name	Type	Description
Byte_C1	Integer	CPH Info ID HB to request via CANopen
Byte_C2	Integer	CPH Info ID LB to request via CANopen

Tabla 17. Variables de entrada del bloque de control y comando CPH_CC.

CPH_CC Inputs		
Name	Type	Description
CPH_Start_Stop_n	Bool	CPH Start/Stop command (0=Stop, 1=Start).

Tabla 18. Variables de salida del bloque de control y comando CPH_CC.

CPH_CC Outputs		
Name	Type	Description
Byte_E1	Integer	CPH ID Info Field - HB to CANopen
Byte_E2	Integer	CPH ID Info Field - LB to CANopen
Byte_E3	Integer	CPH Command - Byte 1 to CANopen
Byte_E4	Integer	CPH Command - Byte 2 to CANopen
Byte_E5	Integer	CPH Command - Byte 3 to CANopen
Byte_E6	Integer	CPH Command - Byte 4 to CANopen
Byte_E7	Integer	CPH Command - Byte 5 to CANopen

4.5.2 Bloque de pretratamiento para el módulo EMS del stack de baterías de litio (LI)

El bloque de pretratamiento para el módulo EMS del stack de baterías de litio (LI), denominado LI_MC (*Lithium Measurement and Conditioning*), se encarga de procesar los datos extraídos de las tramas CANopen recibidas desde dicho módulo, para obtener las medidas del SOC, de la tensión y de la intensidad del stack, así como las tensiones y temperaturas de celda y también indicaciones de alarmas, que vendrán codificadas según el protocolo propietario *Broadcaster v3.1* de Elite Power. Este bloque ha sido programado en lenguaje *Ladder*, y tiene la interfaz que se muestra en la Figura 57. En la Tabla 19, se describen sus variables de entrada, y en la Tabla 20 sus variables de salida. Las variables de salida se encuentran contenidas en dos estructuras, *Lithium_BMS_CANopen_SF* y *Lithium_BMS_CANopen_SF*, creadas como tipos de datos derivados específicamente para esta POU.

Para más información acerca de la codificación de las medidas, estados de funcionamiento y alarmas en el protocolo *Broadcaster v3.1*, así como también sobre su encapsulamiento en tramas CAN y CANopen, léase el apartado 7.1.6 del ANEXO 1: *Communication system*.

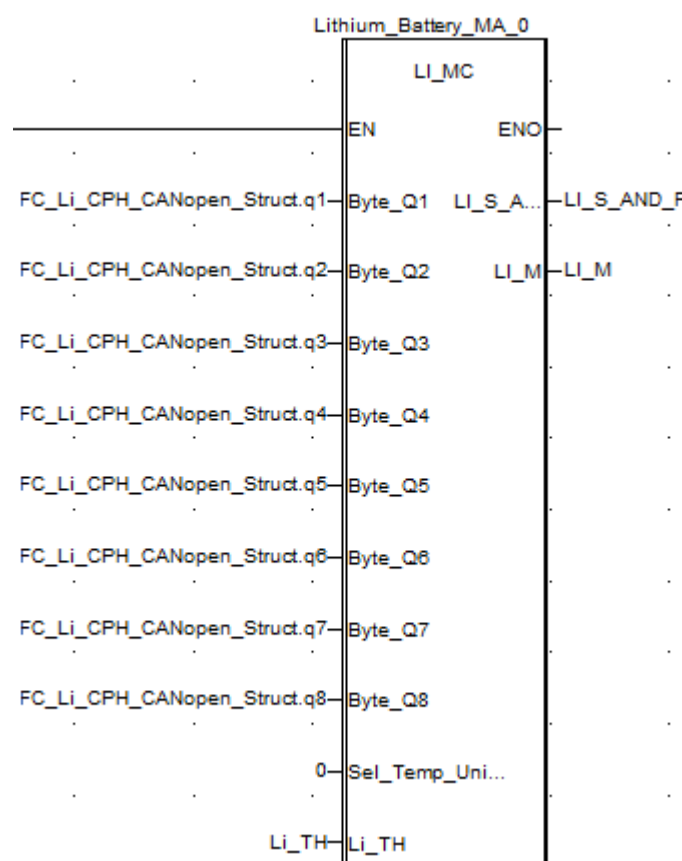


Figura 57. Interfaz del bloque de pretratamiento LI_MC.

Tabla 19. Variables de entrada del bloque de pretratamiento LI_MC.

LI_MC Inputs		
Name	Type	Description
Byte_Q1	Integer	Li Index HB ASCII decimal character from CANopen
Byte_Q2	Integer	Li Index LB ASCII decimal character from CANopen
Byte_Q3	Integer	Li Parm from CANopen
Byte_Q4	Integer	Li Value ASCII sign character from CANopen
Byte_Q5	Integer	Li Value HB ASCII hexadecimal character 1 from CANopen
Byte_Q6	Integer	Li Value ASCII hexadecimal character 2 from CANopen
Byte_Q7	Integer	Li Value ASCII hexadecimal character 3 from CANopen
Byte_Q8	Integer	Li Value LB ASCII hexadecimal character 4 from CANopen
Sel_Temp_Units_C_F_n	Bool	Selection of temperature units (0=Cent Degrees, 1=Fahrenheit Degrees)
Li_TH	Lithium_TH Struct	Lithium battery thresholds for warnings and errors.
Cell_Volt_hwth_r	Real	Cell voltage high warning threshold.
Cell_Volt_lwth_r	Real	Cell voltage low warning threshold.
Cell_Volt_heth_r	Real	Cell voltage high error threshold.
Cell_Volt_leth_r	Real	Cell voltage low error threshold.
SOC_hwth_r	Real	SOC high warning threshold.
SOC_lwth_r	Real	SOC low warning threshold.
SOC_heth_r	Real	SOC high error threshold.
SOC_leth_r	Real	SOC low error threshold.

Tabla 20. Variables de salida del bloque de pretratamiento LI_MC.

LI_MC Outputs		
Name	Type	Description
LI_S_AND_F	Lithium BMS CANopen SF Struct	LI States and flags
LI_S_AND_F.Status_ui	Unsigned integer	Lithium battery status code
LI_S_AND_F.N.Operation_n	Bool	Lithium battery normal operation state
LI_S_AND_F.Error_n	Bool	Lithium battery error state
LI_S_AND_F.Warning_Flags_ui	Unsigned integer	Lithium battery warning flags
LI_S_AND_F.Error_Flags_ui	Unsigned integer	Lithium battery error flags
LI_M	Lithium BMS CANopen M Struct	LI Monitoring
LI_M.Stack_Volt_r	Real	Lithium battery stack voltage (V)
LI_M.Stack_Current_r	Real	Lithium battery stack current (A)
LI_M.Stack_SOC_r	Real	Lithium battery SOC (%)
LI_M.Cell_Avg_Volt_r	Real	Lithium battery average cell voltage (V)
LI_M.Cell_Max_Volt_r	Real	Lithium battery highest cell voltage (V)
LI_M.Index_Cell_Max_V_ui	Unsigned integer	Lithium battery index number of the cell with high voltage
LI_M.Cell_Min_Volt_r	Real	Lithium battery lowest cell voltage (V)
LI_M.Index_Cell_Min_V_ui	Unsigned integer	Lithium battery index number of the cell with lowest voltage
LI_M.Cell_Avg_Temp_r	Real	Lithium battery average cell temperature (°C/°F)
LI_M.Cell_Max_Temp_r	Real	Lithium battery highest cell temperature (°C/°F)
LI_M.Index_Cell_Max_T_ui	Unsigned integer	Lithium battery index number of the cell with highest temperature
LI_M.Cell_Volts_ar	Array of real	Lithium battery voltage of all cells (V)
LI_M.Cell_Temps_ar	Array of real	Lithium battery temperature of all cells (°C/°F)

4.5.3 Bloques de pretratamiento y comando para el electrolizador (EZ) y el convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (CLI)

El bloque de pretratamiento EZ_CLI_MC (*EZ CLI Measurement and Conditioning*), cuya interfaz se muestra en la Figura 58, se encarga de leer periódicamente los registros Modbus del electrolizador (EZ) y del convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (LI), y procesa y acondiciona los datos contenidos en ellos para obtener las medidas de magnitudes, estados de funcionamiento y registros de flags de estos equipos.

Por su parte, el bloque de control y comando EZ_CLI_CC (*EZ CLI Command and Control*), cuya interfaz se muestra en la Figura 59, se encarga de escribir en los registros Modbus del electrolizador y del convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio la codificación correspondiente a los comandos y valores de setpoint de estos equipos. Dicha escritura se realiza por eventos, en el caso de los comandos mediante flancos de subida en las correspondientes variables booleanas de entrada, y en el caso de los setpoints cuando varían.

Se ha decidido implementar tanto el pretratamiento como el comando del electrolizador y del convertidor en los mismos bloques de programa debido a que era necesario incluir códigos para la gestión de las lecturas y escrituras a través de Modbus, ya que el entorno Unity Pro no ofrece ningún recurso similar a un *Real Time Data Base* para tal efecto, y el desarrollo de dicha codificación en POU's separadas resultaba inviable.

Dentro del bloque EZ_CLI_MC, las peticiones de lectura Modbus son gestionadas mediante una POU denominada MB_RM (*Modbus Reading Management*), que es la que se muestra en la Figura 60. Dicha POU contiene una máquina de estados mediante la cual se activan periódicamente y de manera secuencial dos señales de salida booleanas, que han sido asociadas a las variables MB_EZ_RO_p (*Modbus EZ Reading Operation*) y MB_CLI_RO_p (*Modbus CLI Reading Operation*) mediante las cuales se realizan las peticiones de lectura de los registros Modbus del electrolizador y del convertidor respectivamente, empleando para ello la función READ VAR (Figura 61). La máquina de estados de MB_RM está programada en lenguaje *Ladder*, dado que Unity Pro no permite el uso del lenguaje SFC dentro de los bloques de función derivados para la gama de PLC con la que estamos trabajando.

El bloque EZ_CLI_CC contiene una máquina de estados mediante la cual se gestiona el envío de las tramas Modbus y los tiempos de recepción y escritura para cada una de las órdenes del electrolizador y del convertidor. Cada una de las órdenes lleva asociada en el bloque una variable booleana de entrada, y su secuencia de escritura se activa cuando en dicha señal se produce un flanco de subida. En el caso del envío de valores de setpoint, su secuencia de escritura se activa cuando se detecta que han variado. No hay prioridades entre los diferentes comandos y envíos de setpoint, y la máquina de estados ha sido programada de tal manera que, ante dos peticiones simultáneas, no realiza escritura alguna. Para la escritura de los registros Modbus se emplea la función WRITE VAR (Figura 62).

Para evitar concurrencias en las operaciones de lectura y escritura Modbus, lo cual puede ocasionar el bloqueo del puerto TCP/IP del PLC y por tanto la pérdida de la comunicación con el electrolizador y el convertidor, se ha implementado un *mutex* o semáforo, mediante las variables MB_Reading_n y MB_Writing_n.

Este *mutex* funciona de la siguiente manera:

- La variable MB_Reading_n se pone a uno para solicitar una operación de lectura, y se pone a cero cuando la operación de lectura finaliza.
- La variable MB_Writing_n se pone a uno para solicitar una operación de escritura, y se pone a cero cuando la operación de escritura finaliza.
- El bloque EZ_CLI_MC puede leer la variable MB_Writing_n para detectar si se ha solicitado o se está realizando una operación de escritura, y puede poner a uno la variable MB_Reading_n para solicitar una operación de lectura e indicar que se está realizando, o a cero para indicar que la operación de lectura ha finalizado.
- El bloque EZ_CLI_CC puede leer la variable MB_Reading_n para detectar si se ha solicitado o se está realizando una operación de lectura, y puede poner a uno la variable MB_Writing_n para solicitar una operación de escritura e indicar que se está realizando, o a cero para indicar que la operación de escritura ha finalizado.
- Cuando en el bloque EZ_CLI_MC se intenta realizar una operación de lectura, primero se lee el

estado de la variable *MB_Writing_n*. Si está a cero, lo cual significa que la comunicación Modbus está disponible, se pone a uno la variable *MB_Reading_n* y se realiza el proceso de lectura, y cuando este finaliza se pone *MB_Reading_n* a cero para indicar que la comunicación Modbus está nuevamente disponible. Si está a uno, lo cual significa que la comunicación Modbus está siendo usada o ha sido solicitada para escritura, entonces se pone a uno la variable *MB_Reading_n*, para solicitar la operación de lectura Modbus, y cuando *MB_Writing_n* se pone a cero, lo cual significa que la operación de escritura ha finalizado, entonces se realiza la operación de lectura, y cuando esta finaliza se pone *MB_Reading_n* a cero para indicar que la comunicación Modbus está nuevamente disponible.

- Cuando en el bloque EZ_CLI_CC se intenta realizar una operación de escritura, primero se lee el estado de la variable *MB_Reading_n*. Si está a cero, lo cual significa que la comunicación Modbus está disponible, se pone a uno la variable *MB_Writing_n* y se realiza el proceso de escritura, y cuando este finaliza se pone *MB_Writing_n* a cero para indicar que la comunicación Modbus está nuevamente disponible. Si está a uno, lo cual significa que la comunicación Modbus está siendo usada o ha sido solicitada para lectura, entonces se pone a uno la variable *MB_Writing_n*, para solicitar la operación de escritura Modbus, y cuando *MB_Reading_n* se pone a cero, lo cual significa que la operación de lectura ha finalizado, entonces se realiza la operación de escritura, y cuando esta finaliza se pone *MB_Writing_n* a cero para indicar que la comunicación Modbus está nuevamente disponible.

En la Tabla 21, se describen las variables de entrada del bloque de pretratamiento EZ_CLI_MC, y en la Tabla 22 y Tabla 23 sus variables de salida. Las variables de salida se encuentran contenidas en cuatro estructuras, *Electrolyzer_MB_SF*, *Electrolyzer_MB_M*, *Lithium_Convert_MB_SF* y *Lithium_Convert_MB_M*, creadas como tipos de datos derivados específicamente para esta POU.

En la Tabla 24 y Tabla 25, se describen las variables de entrada del bloque de control y comando EZ_CLI_CC, y en la Tabla 26 sus variables de salida.

Para más información acerca de los mapas de Modbus del electrolizador y del convertidor, léanse los apartados 7.1.2 y 7.1.3 del ANEXO 1: *Communication system*.

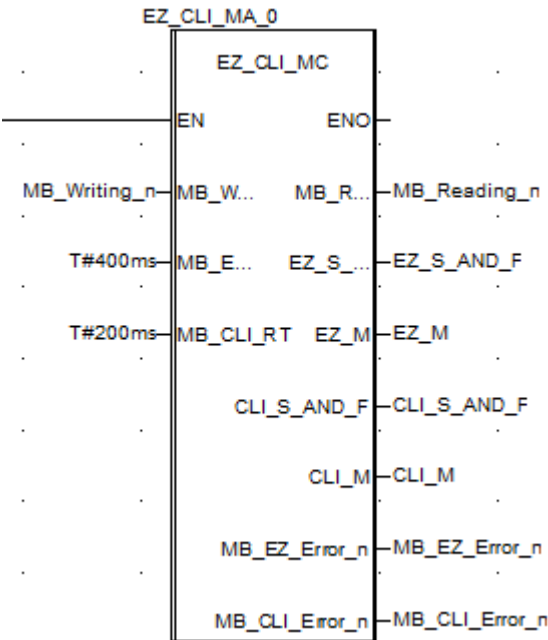


Figura 58. Interfaz del bloque de pretratamiento EZ_CLI_MC.

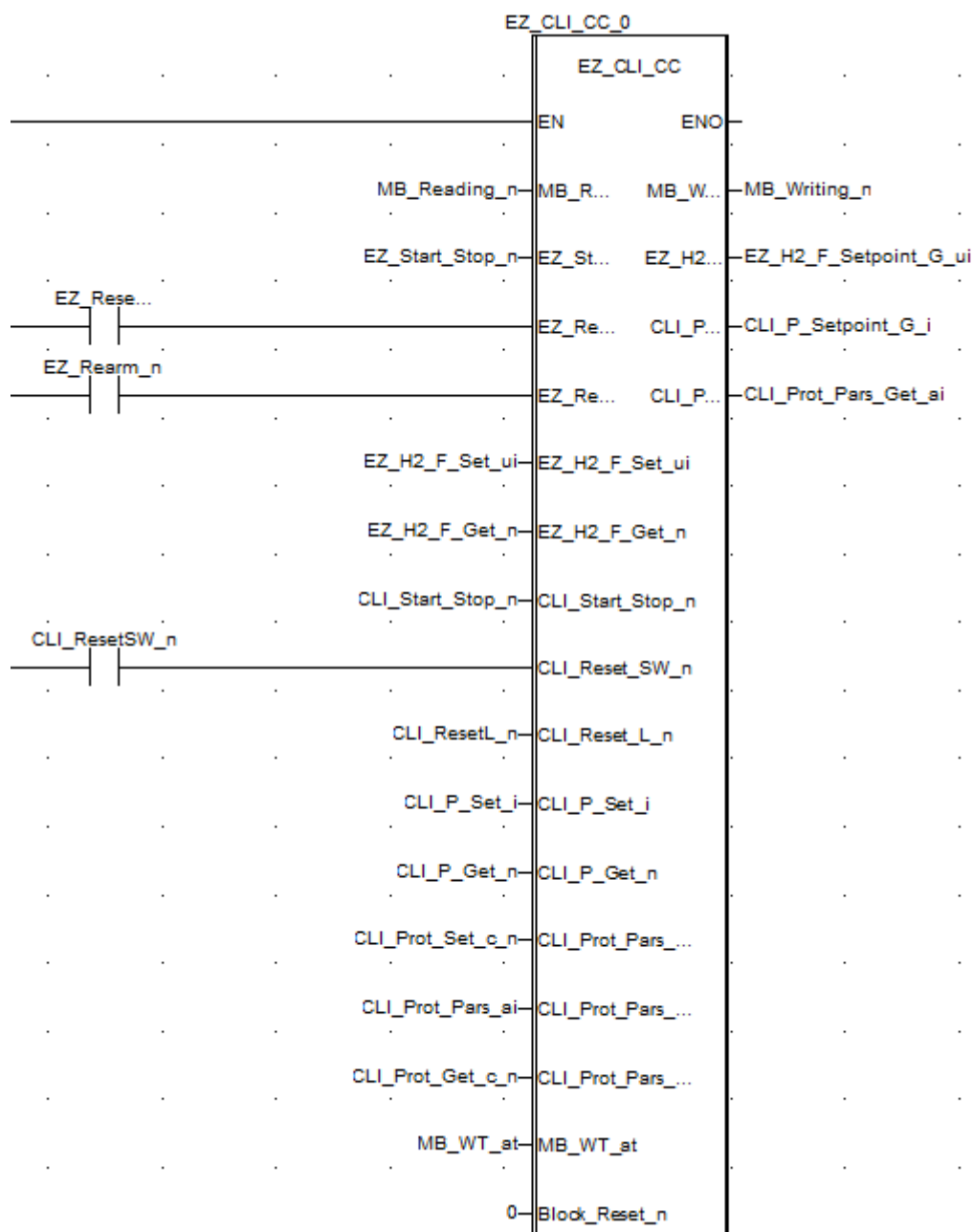


Figura 59. Interfaz del bloque de control y comando EZ_CLI_CC.

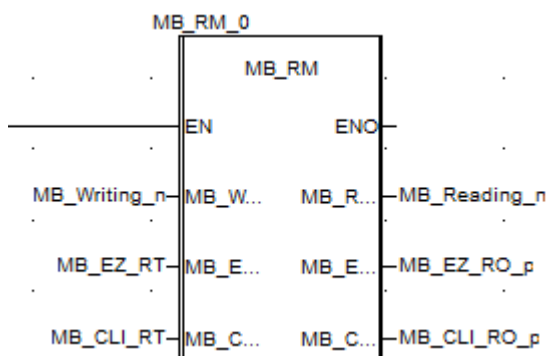


Figura 60. Interfaz del bloque MB_RM.

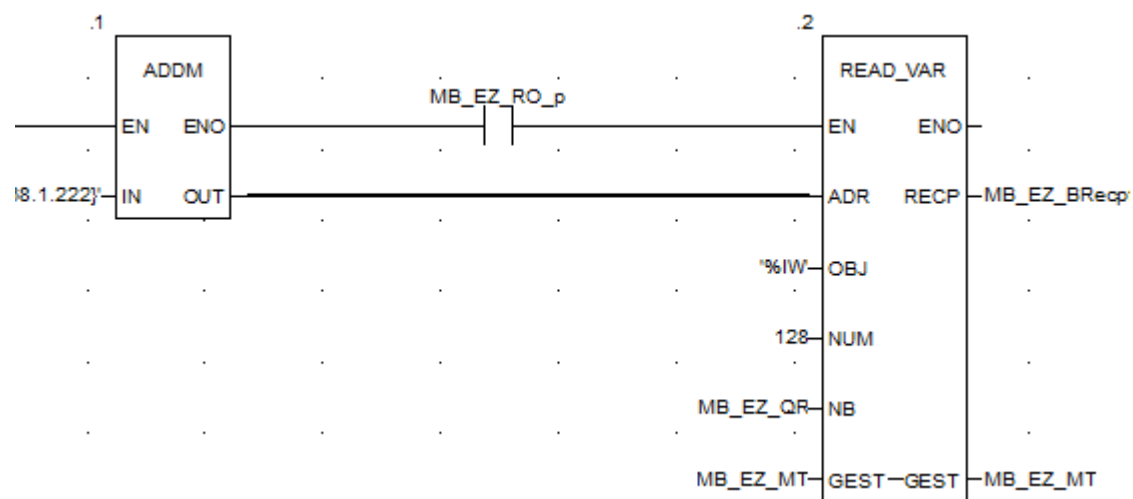


Figura 61. Petición de lectura para los registros Modbus del electrolizador mediante la función READ_VAR.

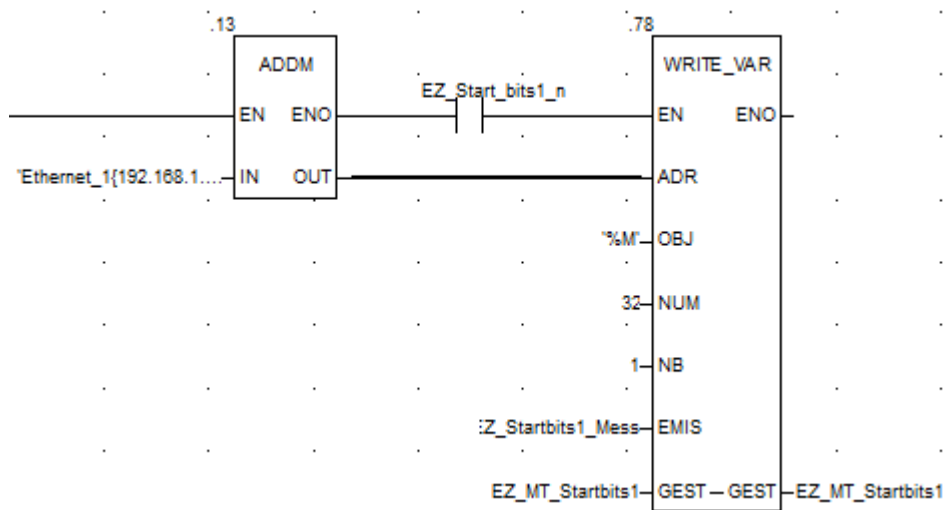


Figura 62. Petición de escritura para la escritura de la orden de marcha en el correspondiente registro Modbus del electrolizador mediante la función WRITE_VAR.

Tabla 21. Variables de entrada del bloque de pretratamiento EZ_CLI_MC.

EZ_CLI_MC Inputs		
Name	Type	Description
MB_Writing_n	Bool	Modbus writing process flag (1=writing process in course)
MB_EZ_RT	Time	Modbus EZ reading delay
MB_CLI_RT	Time	Modbus CLI reading delay

Tabla 22. Variables de salida del bloque de pretratamiento EZ_CLI_MC (Parte 1).

EZ_CLI_MC Outputs		
Name	Type	Description
MB_Reading_n	Bool	Modbus reading process flag (1=reading process in course)
EZ_S_AND_F	Electrolyzer MB SF Struct	Electrolyzer states and flags
EZ_S_AND_F.System_State_ui	Unsigned integer	System state register
EZ_S_AND_F.Syst_Power_On_n	Bool	Power On state
EZ_S_AND_F.Syst_Stand_By_n	Bool	Standby state
EZ_S_AND_F.Syst_Ramp_Up_n	Bool	Ramp Up
EZ_S_AND_F.Syst_Steady_n	Bool	Steady
EZ_S_AND_F.Syst_Ramp_Down_n	Bool	Ramp Down
EZ_S_AND_F.Syst_Purge_n	Bool	Purge
EZ_S_AND_F.Syst_Heating_n	Bool	Heating
EZ_S_AND_F.Syst_Error_n	Bool	Error state
EZ_S_AND_F.System_Substate_ui	Unsigned integer	System Substate register
EZ_S_AND_F.Syst_Wait_Start_Com_n	Bool	Waiting for start command
EZ_S_AND_F.Syst_Wait_Pw_Cond_n	Bool	Waiting for power condition
EZ_S_AND_F.Syst_Delay_DCDC_n	Bool	Delay for DC/DC
EZ_S_AND_F.Syst_Ramp_Down_Ph1_n	Bool	Ramp Down phase 1
EZ_S_AND_F.Syst_Ramp_Down_Ph2_n	Bool	Ramp Down phase 2
EZ_S_AND_F.Syst_Next_SS_Sel_n	Bool	Next substatus selection
EZ_S_AND_F.Syst_Alarm_Low_Water_n	Bool	Alarm low water
EZ_S_AND_F.Syst_Alarm_High_Temp_n	Bool	Alarm high temperature
EZ_S_AND_F.Syst_Alarm_Low_Temp_n	Bool	Alarm low temperature
EZ_S_AND_F.Syst_Alarm_Low_Bat_n	Bool	Alarm low battery
EZ_S_AND_F.Dryer_State_ui	Unsigned integer	Dryer state register
EZ_S_AND_F.Dryer_Standby_n	Bool	Dryer Standby state
EZ_S_AND_F.Dryer_0_n	Bool	Dryer 0
EZ_S_AND_F.Dryer_1_n	Bool	Dryer 1
EZ_S_AND_F.Dryer_Leak_Test_n	Bool	Dryer leak test
EZ_S_AND_F.Dryer_Substate_ui	Unsigned integer	Dryer Substate register
EZ_S_AND_F.System_Warning_Flags_ui	Unsigned integer	Warning flags register
EZ_S_AND_F.System_Error_Flags_ui	Unsigned integer	Error flags register
EZ_S_AND_F.Dryer_Error_Flags_ui	Unsigned integer	Dryer error flags register
EZ_M	Electrolyzer MB M Struct	Electrolyzer measurements
EZ_M.Stack_1_Voltage_r	Real	Stack 1 voltage (V)
EZ_M.Stack_1_Current_r	Real	Stack 1 current (A)
EZ_M.Stack_2_Voltage_r	Real	Stack 2 voltage (V)
EZ_M.Stack_2_Current_r	Real	Stack 2 current (A)
EZ_M.Mod_A_Power_r	Real	Module A power consumption (W)
EZ_M.Stacks_Mod_A_Press_r	Real	Module A stacks pressure (bar)
EZ_M.Buffer_Mod_A_Press_r	Real	Module A buffer pressure (bar)
EZ_M.Output_Press_r	Real	Output pressure (bar)
EZ_M.H2_Flow_Rate_r	Real	Hydrogen flow rate production (NI/h)
EZ_M.Water_Mod_A_Temp_r	Real	Module A water temperature (°C)
EZ_M.Dryer_Pressure_r	Real	Dryer pressure (bar)
EZ_M.Dryer_Temp_Sensor_0_r	Real	Dryer temperature sensor 0 (°C)
EZ_M.Dryer_Temp_Sensor_1_r	Real	Dryer temperature sensor 1 (°C)
EZ_M.Q_Prod_Cycles_Stack_1_ui	Unsigned integer	Quantity of Stack 1 production cycles

Tabla 23. Variables de salida del bloque de pretratamiento EZ_CLI_MC (Parte 2).

EZ_CLI_MC Outputs		
Name	Type	Description
EZ_M.Q_Prod_Cycles_Stack_2_ui	Unsigned integer	Quantity of Stack 2 production cycles
CLI_SF_AND_F	Lithium Convert MB SF Struct	CLI States and Flags
CLI_SF_AND_F.System_State_ui	Unsigned integer	System state register
CLI_SF_AND_F.Syst_Wait_Starting_n	Bool	Waiting for starting command
CLI_SF_AND_F.Syst_Wait_V_bat_V_bus_n	Bool	Waiting for battery voltage and bus voltage
CLI_SF_AND_F.Syst_Precharge_n	Bool	Precharging
CLI_SF_AND_F.Syst_Run_n	Bool	Running
CLI_SF_AND_F.Syst_Standby_n	Bool	Standby state
CLI_SF_AND_F.Syst_Error_n	Bool	Error state
CLI_SF_AND_F.System_Prot_Flags_ui	Unsigned integer	Protection flags register
CLI_SF_AND_F.System_Error_Flags_ui	Unsigned integer	Error flags register
CLI_M	Lithium Convert MB M Struct	CLI Measurements
CLI_M.Bat_Voltage_r	Real	Battery voltage (V)
CLI_M.Bat_Current_r	Real	Battery current (A)
CLI_M.Bat_Power_r	Real	Battery power (W)
CLI_M.Bus_Voltage_r	Real	Bus voltage (V)
CLI_M.Bus_Current_r	Real	Bus current (A)
CLI_M.Bus_Power_r	Real	Bus power (W)
CLI_M.Performance_r	Real	Performance (p.u.)
CLI_M.Coils_Temperature_r	Real	Coils temperature (°C)
CLI_M.IGBTs_Temperature_r	Real	IGBTs temperature (°C)
CLI_M.Bat_DC_Link_Voltage_r	Real	Battery DC link capacitor voltage (V)
CLI_M.Bus_DC_Link_Voltage_r	Real	Bus DC link capacitor voltage (V)
MB_EZ_Error_n	Bool	Error in EZ Modbus communication
MB_CLI_Error_n	Bool	Error in CLI Modbus communication

Tabla 24. Variables de entrada del bloque de control y comando EZ_CLI_CC (Parte 1).

EZ_CLI_CC Inputs		
Name	Type	Description
MB_Reading_n	Bool	Modbus reading process flag (1=reading process in course)
EZ_Start_Stop_n	Bool	EZ Start/Stop command signal (1=Start, 0=Stop)
EZ_Reset_n	Bool	EZ Reset of Start/Stop bits command (1=Reset, 0=No reset)
EZ_Rearm_n	Bool	EZ Rearm command signal (1=Rearm, 0=No rearm)
EZ_H2_F_Set_ui	Unsigned integer	EZ H2 Flow rate setpoint (% NI/h)
EZ_H2_F_Get_ui	Unsigned integer	EZ Command signal for getting H2 Flow Rate setpoint value
CLI_Start_Stop_n	Bool	CLI Start/Stop command signal (1=Start, 0=Stop)
CLI_Reset_SW_n	Bool	CLI Software reset signal
CLI_Reset_L_n	Bool	CLI Limits reset signal
CLI_P_Set_i	Integer	CLI Power setpoint (W)
CLI_P_Get_n	Bool	CLI Command signal for getting power setpoint value
CLI_Prot_Pars_Set_n	Bool	CLI Protection parameters setting signal
CLI_Prot_Pars_Set_ai	Array of integer	CLI Protection parameters
CLI_Prot_Pars_Set_ai[1]	Integer	Minimum limit of battery voltage (V)
CLI_Prot_Pars_Set_ai[2]	Integer	Maximum limit of battery voltage (V)
CLI_Prot_Pars_Set_ai[3]	Integer	Minimum limit of bus voltage (V)
CLI_Prot_Pars_Set_ai[4]	Integer	Maximum limit of bus voltage (V)
CLI_Prot_Pars_Set_ai[5]	Integer	Minimum limit of battery current (A)
CLI_Prot_Pars_Set_ai[6]	Integer	Maximum limit of battery current (A)
CLI_Prot_Pars_Set_ai[7]	Integer	Minimum limit of bus current (A)
CLI_Prot_Pars_Set_ai[8]	Integer	Maximum limit of bus current (A)
CLI_Prot_Pars_Set_ai[9]	Integer	Minimum limit of battery power (W)
CLI_Prot_Pars_Set_ai[10]	Integer	Maximum limit of battery power (W)
CLI_Prot_Pars_Set_ai[11]	Integer	Minimum limit of bus power (W)
CLI_Prot_Pars_Set_ai[12]	Integer	Maximum limit of bus power (W)
CLI_Prot_Pars_Set_ai[13]	Integer	Maximum coil temperature (°C)
CLI_Prot_Pars_Set_ai[14]	Integer	Maximum IGBT temperature (°C)
CLI_Prot_Pars_Get_n	Bool	CLI command signal for getting protection parameters values
MB_WT_at	Array of time	Modbus writing delays
MB_WT_at[1]	Time	EZ Start Command. Delay for sending of Starting Bits setting/resetting message.
MB_WT_at[2]	Time	EZ Start Command. Delay for MB writing transaction finish.
MB_WT_at[3]	Time	EZ Stop Command. Delay for sending of Stopping Bits setting/resetting message.
MB_WT_at[4]	Time	EZ Stop Command. Delay for MB writing transaction finish.
MB_WT_at[5]	Time	EZ Reset Command. Delay for sending of Reset Bits setting/resetting message.
MB_WT_at[6]	Time	EZ Reset Command. Delay for MB writing transaction finish.
MB_WT_at[7]	Time	EZ Rearm Command. Delay for sending of Rearming Bits setting/resetting message.
MB_WT_at[8]	Time	EZ Rearm Command. Delay for MB writing transaction finish.
MB_WT_at[9]	Time	EZ H2 F Setpoint Setting. Delay for sending of H2F Setting message.
MB_WT_at[10]	Time	EZ H2 F Setpoint Setting. Delay for MB writing transaction finish.
MB_WT_at[11]	Time	EZ H2 F Setpoint Getting. Delay for sending of H2F Getting message.
MB_WT_at[12]	Time	EZ H2 F Setpoint Getting. Delay for MB reading transaction finish.
MB_WT_at[13]	Time	CLI Start Command. Delay for sending of Starting Bits setting/resetting message.
MB_WT_at[14]	Time	CLI Start Command. Delay for MB writing transaction finish.
MB_WT_at[15]	Time	CLI Stop Command. Delay for sending of Stopping Bits setting/resetting message.
MB_WT_at[16]	Time	CLI Stop Command. Delay for MB writing transaction finish.
MB_WT_at[17]	Time	CLI Reset SW Command. Delay for sending of Reset SW Bits setting/resetting message.
MB_WT_at[18]	Time	CLI Reset SW Command. Delay for MB writing transaction finish.
MB_WT_at[19]	Time	CLI Reset Limits Command. Delay for sending of Reset SW Bits setting/resetting message.
MB_WT_at[20]	Time	CLI Reset Limits Command. Delay for MB writing transaction finish.

Tabla 25. Variables de entrada del bloque de control y comando EZ_CLI_CC (Parte 2).

EZ_CLI_CC Inputs		
Name	Type	Description
MB_WT_at[21]	Time	CLI Power Setpoint Setting. Delay for sending of Power Setting message.
MB_WT_at[22]	Time	CLI Power Setpoint Setting. Delay for MB writing transaction finish.
MB_WT_at[23]	Time	CLI Power Getpoint Setting. Delay for sending of Power Getting message.
MB_WT_at[24]	Time	CLI Power Getpoint Setting. Delay for MB reading transaction finish.
MB_WT_at[25]	Time	CLI Prot Pars Setting. Delay for sending of Protection Pars setting message.
MB_WT_at[26]	Time	CLI Prot Pars Setting. Delay for MB writing transaction finish.
MB_WT_at[27]	Time	CLI Prot Pars Getting. Delay for sending of Protection Pars Getting message.
MB_WT_at[28]	Time	CLI Prot Pars Getting. Delay for MB reading transaction finish.
Block_Reset_n	Bool	Block program external reset signal.

Tabla 26. Variables de salida del bloque de control y comando EZ_CLI_CC.

EZ_CLI_CC Outputs		
Name	Type	Description
MB_Writing_n	Bool	Modbus writing process flag (1=writing process in course)
EZ_H2_F_Setpoint_G_ui	Unsigned integer	EZ H2 Flow Setpoint value got
CLI_P_Setpoint_G_i	Integer	CLI Power Setpoint value got
CLI_Prot_Pars_Get_ai	Array of integer	CLI Protection parameters values got
CLI_Prot_Pars_Get_ai[1]	Integer	Battery voltage minimum limit (V)
CLI_Prot_Pars_Get_ai[2]	Integer	Battery voltage mimaximum limit (V)
CLI_Prot_Pars_Get_ai[3]	Integer	Bus voltage minimum limit (V)
CLI_Prot_Pars_Get_ai[4]	Integer	Bus voltage maximum limit (V)
CLI_Prot_Pars_Get_ai[5]	Integer	Battery current minimum limit (A)
CLI_Prot_Pars_Get_ai[6]	Integer	Battery current mimaximum limit (A)
CLI_Prot_Pars_Get_ai[7]	Integer	Bus current minimum limit (A)
CLI_Prot_Pars_Get_ai[8]	Integer	Bus current maximum limit (A)
CLI_Prot_Pars_Get_ai[9]	Integer	Battery power minimum limit (W)
CLI_Prot_Pars_Get_ai[10]	Integer	Battery power mimaximum limit (W)
CLI_Prot_Pars_Get_ai[11]	Integer	Bus power minimum limit (W)
CLI_Prot_Pars_Get_ai[12]	Integer	Bus power mimaximum limit (W)
CLI_Prot_Pars_Get_ai[13]	Integer	Coil temperature maximum limit
CLI_Prot_Pars_Get_ai[14]	Integer	IGBT temperature maximum limit

4.5.4 Bloques de pretratamiento y comando para la pila de hidrógeno (FC)

El bloque de pretratamiento FC_CM (*Fuel Cell Measurement and Conditioning*), cuya interfaz se muestra en la Figura 63, se encarga de procesar los datos extraídos de las tramas CANopen recibidas desde la pila de hidrógeno, para obtener a partir de ellas los valores de las magnitudes medidas, el estado de funcionamiento y los registros con los flags de alarma y de *warning* de dicho equipo. En la Tabla 27 se describen sus variables de entrada, y en la Tabla 28 sus variables de salida. Las variables de salida se encuentran contenidas en dos estructuras, *DCDC_Conv_to_H2_FC_CANopen_M* y *DCDC_Conv_to_H2_FC_CANopen_SF*, creadas como tipos de datos derivados específicamente para esta POU.

Por su parte, el bloque de control y comando FC_CC (*Fuel Cell Command and Control*), cuya interfaz se muestra en la Figura 64, se encarga de generar y enviar a través de CANopen los códigos necesarios para los comandos de encendido, apagado y rearme de la pila de hidrógeno. En la Tabla 29 se describen sus variables de entrada, y en la Tabla 30 sus variables de salida.

Para más información acerca del encapsulamiento de las medidas de magnitudes, registros de flags y códigos de estado y de comandos en las tramas CAN y CANopen, léanse los apartados 7.1.5 y 7.1.8 del *ANEXO I: Communication system*.

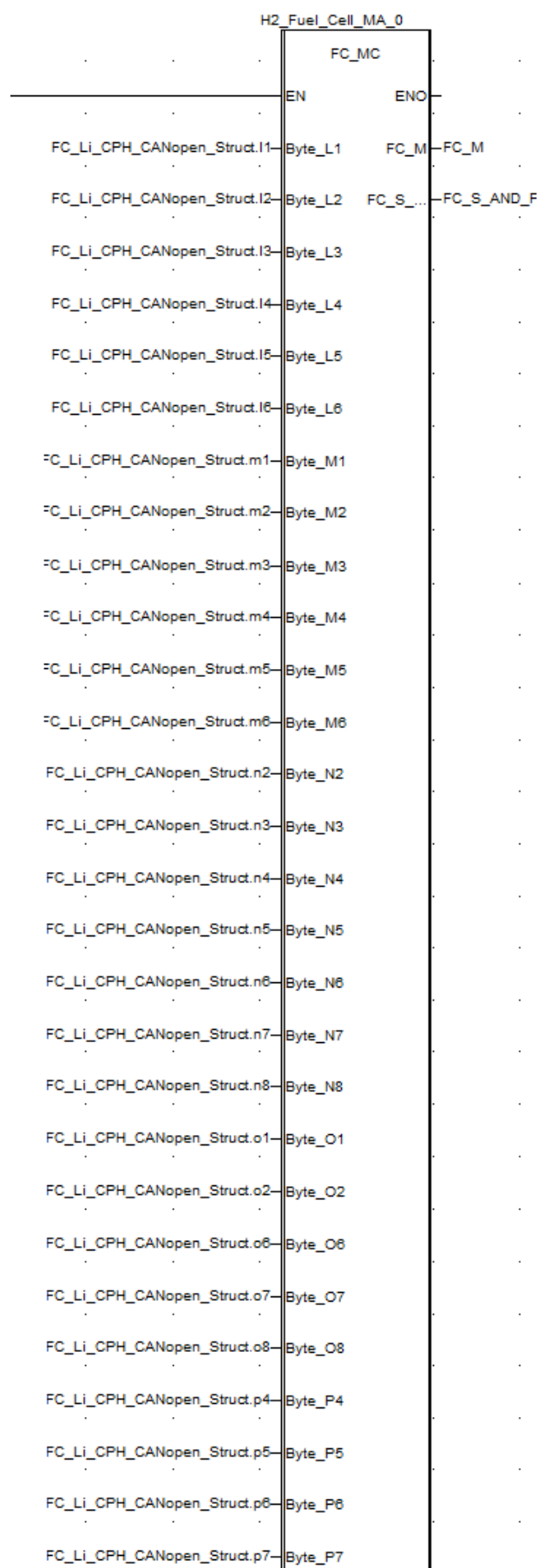


Figura 63. Interfaz del bloque de pretratamiento FC_MC.

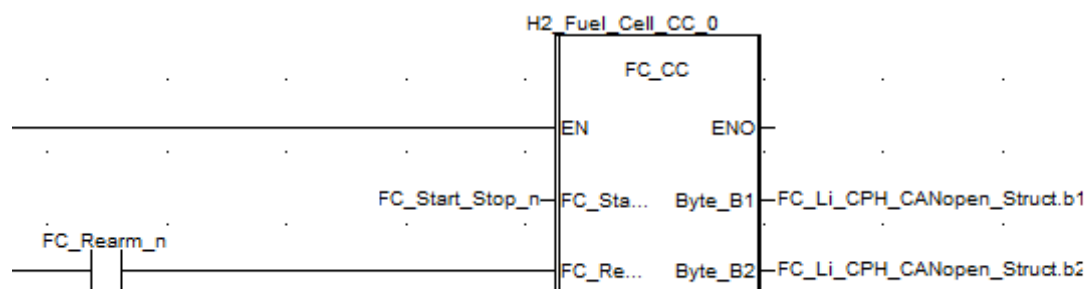


Figura 64. Interfaz del bloque de control y comando FC_CC.

Tabla 27. Variables de entrada del bloque de pretratamiento FC_MC.

FC_MC Inputs		
Name	Type	Description
Byte_L1	Integer	FC Stack Voltage HB from CANopen
Byte_L2	Integer	FC Stack Voltage LB from CANopen
Byte_L3	Integer	FC Stack Current HB from CANopen
Byte_L4	Integer	FC Stack Current LB from CANopen
Byte_L5	Integer	FC System Current HB from CANopen
Byte_L6	Integer	FC System Current LB from CANopen
Byte_M1	Integer	FC Stack Temperature HB from CANopen
Byte_M2	Integer	FC Stack Temperature LB from CANopen
Byte_M3	Integer	FC Warning Flags 1 Byte from CANopen
Byte_M4	Integer	FC Warning Flags 2 Byte from CANopen
Byte_M5	Integer	FC H2 Concentration HB from CANopen
Byte_M6	Integer	FC H2 Concentration LB from CANopen
Byte_N2	Integer	FC System Pressure HB from CANopen
Byte_N3	Integer	FC System Pressure LB from CANopen
Byte_N4	Integer	FC System Voltage HB from CANopen
Byte_N5	Integer	FC System Voltage LB from CANopen
Byte_N6	Integer	FC Ambient Temperature HB from CANopen
Byte_N7	Integer	FC Ambient Temperature LB from CANopen
Byte_N8	Integer	FC System State Byte from CANopen
Byte_O1	Integer	FC Fan Speed HB from CANopen
Byte_O2	Integer	FC Fan Speed LB from CANopen
Byte_O6	Integer	FC Information Flags Byte from CANopen
Byte_O7	Integer	FC H2 Inlet Pressure HB from CANopen
Byte_O8	Integer	FC H2 Inlet Pressure LB from CANopen
Byte_P4	Integer	FC Error Flags 1 Byte from CANopen
Byte_P5	Integer	FC Error Flags 2 Byte from CANopen
Byte_P6	Integer	FC Error Flags 3 Byte from CANopen
Byte_P7	Integer	FC Error Flags 4 Byte from CANopen

Tabla 28. Variables de salida del bloque de pretratamiento FC_MC.

FC_MC Outputs		
Name	Type	Description
FC_M	H2 FC CANopen M Struct	FC Measurements
FC_M.System_Voltage_r	Real	System voltage (V)
FC_M.System_Current_r	Real	System current self consumption (A)
FC_M.System_Pressure_r	Real	System pressure (Bar)
FC_M.Stack_Voltage_r	Real	Stack voltage (V)
FC_M.Stack_Current_r	Real	Stack current (A)
FC_M.Stack_Temperature_r	Real	Stack temperature (°C)
FC_M.H2_Inlet_Pressure_r	Real	H2 Inlet pressure (Bar)
FC_M.H2_Concentration_r	Real	H2 Concentration (ppm)
FC_M.Ambient_Temperature_r	Real	Ambient temperature (°C)
FC_M.Fan_Speed_r	Real	Fan speed (rpm)
FC_S_AND_F	H2 FC CANopen SF Struct	FC States and Flags
FC_S_AND_F.System_State_ui	Unsigned integer	System state register
FC_S_AND_F.System_Init_n	Bool	Initializing state
FC_S_AND_F.System_Off_n	Bool	Off state
FC_S_AND_F.System_Standby_n	Bool	Standby state
FC_S_AND_F.System_Start_n	Bool	Starting state
FC_S_AND_F.System_Run_n	Bool	Running state
FC_S_AND_F.System_Cat_Clean_n	Bool	Catalyst clean
FC_S_AND_F.System_Shutdown_n	Bool	Shutdown
FC_S_AND_F.System_Error_n	Bool	Error state
FC_S_AND_F.Warning_Flags_1_ui	Unsigned integer	Warning flags register 1
FC_S_AND_F.Warning_Flags_2_ui	Unsigned integer	Warning flags register 2
FC_S_AND_F.Error_Flags_1_ui	Unsigned integer	Error flags register 1
FC_S_AND_F.Error_Flags_2_ui	Unsigned integer	Error flags register 2
FC_S_AND_F.Error_Flags_3_ui	Unsigned integer	Error flags register 3
FC_S_AND_F.Error_Flags_4_ui	Unsigned integer	Error flags register 4
FC_S_AND_F.Info_Flags_ui	Unsigned integer	Information flags register

Tabla 29. Variables de entrada del bloque de control y comando FC_CC.

FC_CC Inputs		
Name	Type	Description
FC_Start_Stop_n	Bool	FC Start & Stop command (1=Start, 0=Stop)
FC_Rearm_n	Bool	FC Rearm (1=Rearm, 0=No rearm)

Tabla 30. Variables de salida del bloque de control y comando FC_CC.

FC_CC Outputs		
Name	Type	Description
Byte_B1	Integer	FC Fuel Cell parameter code byte to CANopen
Byte_B2	Integer	FC Fuel Cell system command byte to CANopen

4.5.5 Bloques de pretratamiento y comando para el convertidor DC/DC asociado a la pila de hidrógeno (CFC)

El bloque de pretratamiento CFC_CM (*Converter to Fuel Cell Measurement and Conditioning*), cuya interfaz se muestra en la Figura 65, se encarga de procesar los datos extraídos de las tramas CANopen recibidas desde el convertidor DC/DC asociado a la pila de hidrógeno, para obtener a partir de ellas los valores de las magnitudes medidas, el estado de funcionamiento y los registros con los flags de alarma y de *warning* de dicho equipo. En la Tabla 31 se describen sus variables de entrada, y en la Tabla 32 sus variables de salida. Las variables de salida se encuentran contenidas en dos estructuras, *DCDC_Conv_to_H2_FC_CANopen_M* y *DCDC_Conv_to_H2_FC_CANopen_SF*, creadas como tipos de datos derivados específicamente para esta POU.

Por su parte, el bloque de control y comando CFC_CC (*Converter to Fuel Cell Command and Control*), cuya interfaz se muestra en la Figura 66, se encarga de empaquetar y enviar a través de CANopen los valores de setpoint y los códigos necesarios para los comandos de encendido, apagado y rearme del convertidor DC/DC asociado a la pila de hidrógeno. En la Tabla 33 se describen sus variables de entrada, y en la Tabla 34 sus variables de salida.

Para más información acerca del encapsulamiento de las medidas de magnitudes, registros de flags y códigos de estado y de comandos en las tramas CAN y CANopen, léanse los apartados 7.1.4 y 7.1.8 del *ANEXO I: Communication system*.

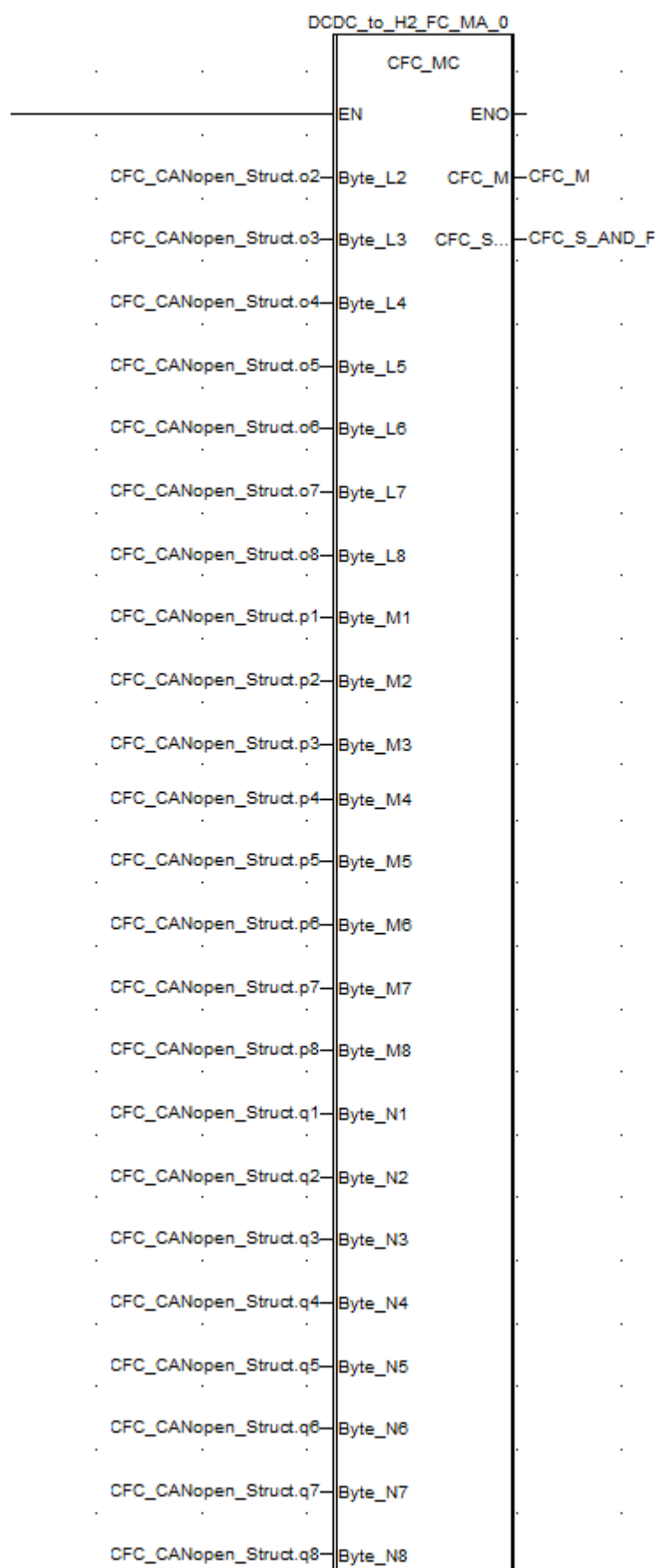


Figura 65. Interfaz del bloque de pretratamiento CFC_MC.

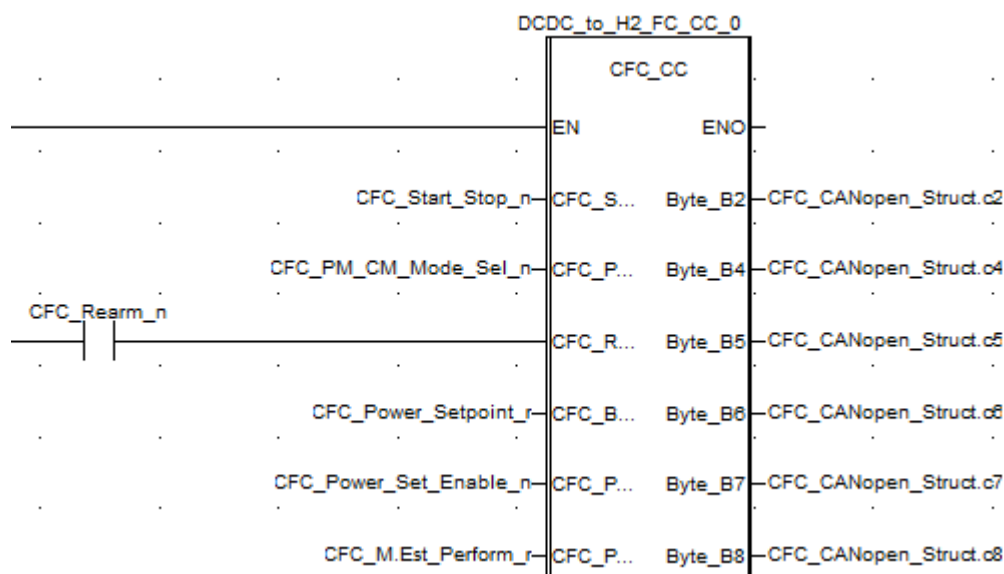


Figura 66. Interfaz del bloque de control y comando CFC_CC.

Tabla 31. Variables de entrada del bloque de pretratamiento CFC_MC.

CFC_MC Inputs		
Name	Type	Description
Byte_L2	Integer	CFC Status byte from CANopen
Byte_L3	Integer	CFC Error flags 1 byte from CANopen
Byte_L4	Integer	CFC Error flags 2 byte from CANopen
Byte_L5	Integer	CFC Power setpoint received HB Byte 1 from CANopen
Byte_L6	Integer	CFC Power setpoint received Byte 2 from CANopen
Byte_L7	Integer	CFC Power setpoint received Byte 3 from CANopen
Byte_L8	Integer	CFC Power setpoint received LB Byte 4 from CANopen
Byte_M1	Integer	CFC Input bus voltage HB Byte 1 from CANopen
Byte_M2	Integer	CFC Input bus voltage Byte 2 from CANopen
Byte_M3	Integer	CFC Input bus voltage Byte 3 from CANopen
Byte_M4	Integer	CFC Input bus voltage HB Byte 4 from CANopen
Byte_M5	Integer	CFC Output bus voltage HB Byte 1 from CANopen
Byte_M6	Integer	CFC Output bus voltage Byte 2 from CANopen
Byte_M7	Integer	CFC Output bus voltage Byte 3 from CANopen
Byte_M8	Integer	CFC Output bus voltage HB Byte 4 from CANopen
Byte_N1	Integer	CFC Input bus current HB Byte 1 from CANopen
Byte_N2	Integer	CFC Input bus current Byte 2 from CANopen
Byte_N3	Integer	CFC Input bus current Byte 3 from CANopen
Byte_N4	Integer	CFC Input bus current HB Byte 4 from CANopen
Byte_N5	Integer	CFC Output bus current HB Byte 1 from CANopen
Byte_N6	Integer	CFC Output bus current Byte 2 from CANopen
Byte_N7	Integer	CFC Output bus current Byte 3 from CANopen
Byte_N8	Integer	CFC Output bus current HB Byte 4 from CANopen

Tabla 32. Variables de salida del bloque de pretratamiento CFC_MC.

CFC_MC Outputs		
Name	Type	Description
CFC_M	DCDC Conv to H2 FC CANopen M Struct	CFC Measurements
CFC_M.In_Bus_Voltage_r	Real	CFC Input bus voltage (V)
CFC_M.In_Bus_Current_r	Real	CFC Input bus current (A)
CFC_M.In_Bus_Power_r	Real	CFC Input bus power (W)
CFC_M.Out_Bus_Voltage_r	Real	CFC Output bus voltage (V)
CFC_M.Out_Bus_Current_r	Real	CFC Output bus current (A)
CFC_M.Out_Bus_Power_r	Real	CFC Output bus power (W)
CFC_M.In_Bus_Power_Set_r	Real	CFC Input bus power setpoint received (W)
CFC_M.Est_Perform_r	Real	CFC Estimated performance (p.u)
CFC_S_AND_F	DCDC Conv to H2 FC CANopen SF Struct	CFC States and Flags
CFC_S_AND_F.System_State_ui	Unsigned integer	CFC Status register
CFC_S_AND_F.System_Standby_n	Bool	CFC Standby state
CFC_S_AND_F.System_Init_CM_n	Bool	CFC Initializing current mode state
CFC_S_AND_F.System_Init_PM_n	Bool	CFC Initializing power mode state
CFC_S_AND_F.System_Run_CM_n	Bool	CFC Running in current mode state
CFC_S_AND_F.System_Run_PM_n	Bool	CFC Running in power mode state
CFC_S_AND_F.System_Error_n	Bool	CFC Error state
CFC_S_AND_F.Error_Flags_1_ui	Unsigned integer	CFC Error flags register 1
CFC_S_AND_F.Error_Flags_2_ui	Unsigned integer	CFC Error flags register 2

Tabla 33. Variables de entrada del bloque de control y comando CFC_CC.

CFC_CC Inputs		
Name	Type	Description
CFC_Start_Stop_n	Bool	CFC Start/Stop command (1=Start, 0=Stop)
CFC_PM_CM_Mode_Sel_n	Bool	CFC Mode Selection (1=Current Mode, 0=Power Mode)
CFC_Rearm_n	Bool	CFC Rearming command (1=Rearm, 0=No rearm)
CFC_Bus_Out_P_Setpoint_r	Real	CFC Output bus power setpoint (W)
CFC_Power_Set_Enable_n	Bool	CFC Setpoint enabling (1=Enabled, 0=Disabled)
CFC_Performance_r	Real	CFC Performance (p.u)

Tabla 34. Variables de salida del bloque de control y comando CFC_CC.

CFC_CC Outputs		
Name	Type	Description
Byte_B2	Integer	CFC PLC Status Byte to CANopen
Byte_B4	Integer	CFC Command Byte to CANopen
Byte_B5	Integer	CFC Power Setpoint HB Byte 1 to CANopen
Byte_B6	Integer	CFC Power Setpoint Byte 2 to CANopen
Byte_B7	Integer	CFC Power Setpoint Byte 3 to CANopen
Byte_B8	Integer	CFC Power Setpoint HB Byte 4 to CANopen

4.5.6 Bloques de pretratamiento y comando para la fuente de alimentación programable (PS)

El bloque de pretratamiento PS_MC (*Power Supply Measurement and Conditioning*), cuya interfaz se muestra en la Figura 67, se encarga de realizar el escalado de las señales analógicas procedentes de la fuente de alimentación programable, que son señales de tensión de 0 a 10 V, para la obtención de las medidas de tensión e intensidad en el bus de salida de dicho equipo, que son magnitudes que varían entre 0-60 V y 0-50 A respectivamente para la configuración del equipo con la que se está trabajando. También, a partir de las medidas de tensión e intensidad obtenidas, calcula y proporciona la potencia generada por el equipo, e infiere su estado de funcionamiento. En la Tabla 35 se describen sus variables de entrada, y en la Tabla 36 sus variables de salida.

Por su parte, el bloque de control y comando PS_CC (*Power Supply Command and Control*), cuya interfaz se muestra en la Figura 68, se encarga de escalar los *setpoints* de tensión e intensidad establecidos para la fuente de alimentación programable, para convertirlos también en señales analógicas de tensión de 0 a 10 V, y también de aplicarles una rampa de variación según unos valores de *Set_Rate* especificados. En la Tabla 37 se describen sus variables de entrada, y en la Tabla 38 sus variables de salida.

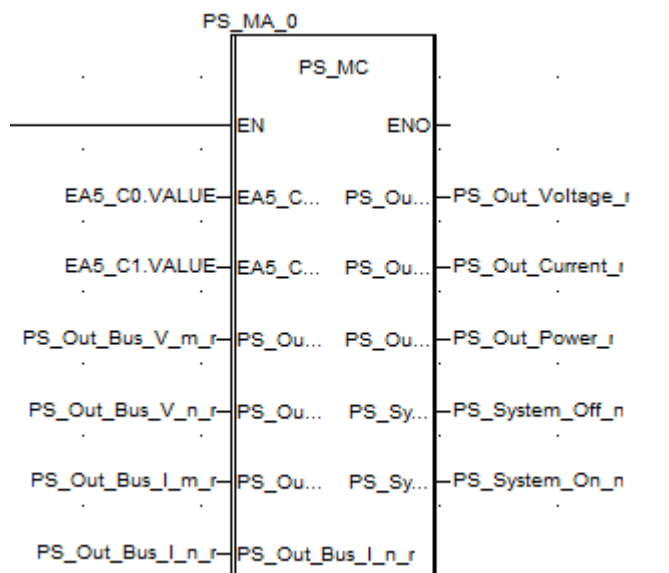


Figura 67. Interfaz del bloque de pretratamiento PS_MC.

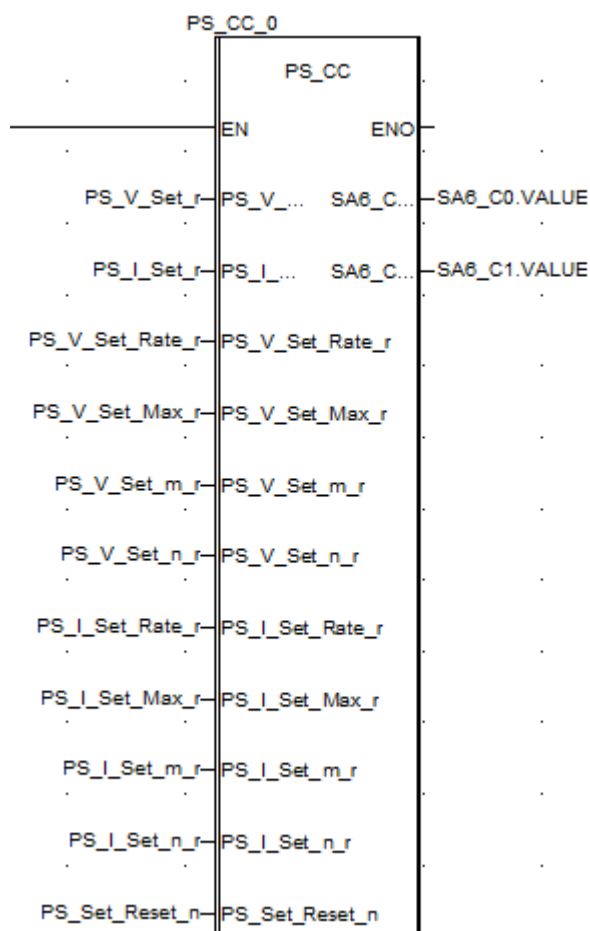


Figura 68. Interfaz del bloque de control y comando PS_CC.

Tabla 35. Variables de entrada del bloque de pretratamiento PS_MC.

PS_MC Inputs		
Name	Type	Description
EA5_C0_Value	Integer	Analogic Input 5 Channel 0 - PS Output Bus Voltage (0...10 V signal)
EA5_C1_Value	Integer	Analogic Input 5 Channel 1 - PS Output Bus Current (0...10 V signal)
PS_Out_Bus_V_m_r	Real	PS Output Bus V - Slope of Scale Line
PS_Out_Bus_V_n_r	Real	PS Output Bus V - Origin of Scale Line
PS_Out_Bus_I_m_r	Real	PS Output Bus I - Slope of Scale Line
PS_Out_Bus_I_n_r	Real	PS Output Bus I - Origin of Scale Line

Tabla 36. Variables de salida del bloque de pretratamiento PS_MC.

PS_MC Outputs		
Name	Type	Description
PS_Out_Bus_Voltage_r	Real	PS Output bus voltage (V)
PS_Out_Bus_Current_r	Real	PS Output bus current (A)
PS_Out_Bus_Power_r	Real	PS Output bus power (W)
PS_System_Off_n	Bool	PS Off
PS_System_On_n	Bool	PS On

Tabla 37. Variables de entrada del bloque de control y comando PS_CC.

PS_CC Inputs		
Name	Type	Description
PS_V_Set_r	Real	PS Output bus voltage setpoint (V)
PS_I_Set_r	Real	PS Output bus current setpoint (A)
PS_V_Set_Rate_r	Real	PS Output bus voltage setpoint variation rate (V/s)
PS_V_Set_Max_r	Real	PS Maximum output bus voltage setpoint (V)
PS_V_Set_m_r	Real	PS Output bus voltage - Slope of scale line
PS_V_Set_n_r	Real	PS Output bus voltage - Origin of scale line
PS_I_Set_Rate_r	Real	PS Output bus current setpoint variation rate (A/s)
PS_I_Set_Max_r	Real	PS Maximum output bus current setpoint (A)
PS_I_Set_m_r	Real	PS Output bus current - Slope of scale line
PS_I_Set_n_r	Real	PS Output bus current - Origin of scale line
PS_Set_Reset_n	Bool	PS Setpoint reset

Tabla 38. Variables de salida del bloque de control y comando PS_CC.

PS_CC Outputs		
Name	Type	Description
SA6_C0_Value	Integer	Analog Output 6 Channel 0 - PS Output Voltage Setpoint (0...10 V signal)
SA6_C1_Value	Integer	Analog Output 6 Channel 1 - PS Output Voltage Setpoint (0...10 V signal)

4.5.7 Bloques de pretratamiento y comando para la carga electrónica programable (DCL)

El bloque de pretratamiento DCL_MC (*DC Load Measurement and Conditioning*), cuya interfaz se muestra en la Figura 69, se encarga de realizar el escalado de las señales analógicas procedentes de la carga electrónica programable, que son señales de tensión de 0 a 10 V, para la obtención de las medidas de tensión e intensidad en el bus de entrada de dicho equipo, que son magnitudes que varían entre 0-60 V y 0-50 A respectivamente para la configuración del equipo con la que se está trabajando. También, a partir de las medidas de tensión e intensidad obtenidas, calcula y proporciona la potencia generada por el equipo, e infiere su estado de funcionamiento. En la Tabla 39 se describen sus variables de entrada, y en la Tabla 40 sus variables de salida.

Por su parte, el bloque de control y comando DCL_CC (*DC Load Command and Control*), cuya interfaz se muestra en la Figura 69, se encarga de escalar el *setpoint* de potencia establecido para la fuente de alimentación programable, para convertirlo también en una señal analógica de tensión de 0 a 10 V, y también de aplicarle una rampa de variación según un valor de *Set_Rate* especificado. En la Tabla 41 se describen sus variables de entrada, y en la Tabla 42 sus variables de salida.

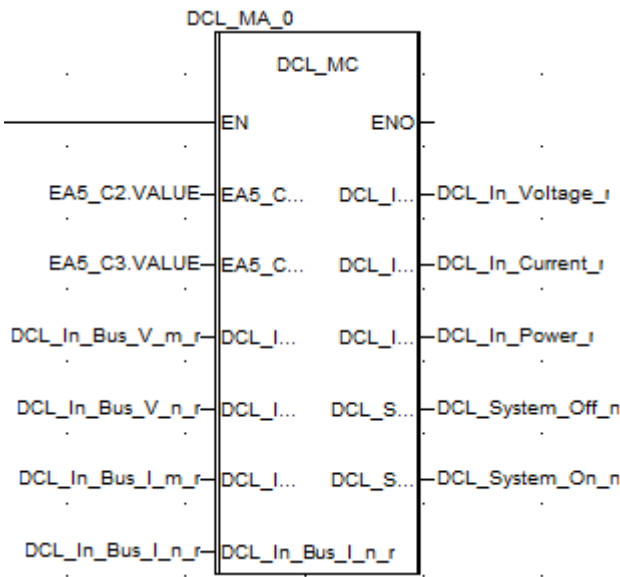


Figura 69. Interfaz del bloque de pretratamiento DCL_MC.

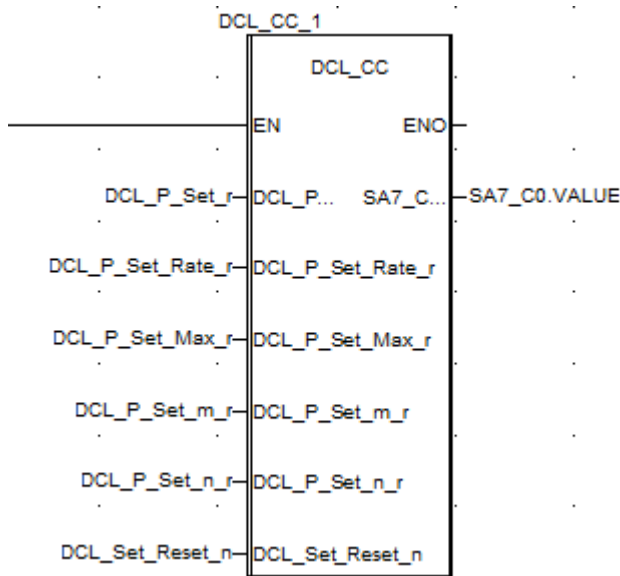


Figura 70. Interfaz del bloque de control y comando DCL_CC.

Tabla 39. Variables de entrada del bloque de pretratamiento DCL_MC.

DCL_MC Inputs		
Name	Type	Description
EA5_C2_Value	Integer	Analogic Input 5 Channel 2 - DCL Output Bus Voltage (0...10 V signal)
EA5_C3_Value	Integer	Analogic Input 5 Channel 3 - DCL Output Bus Current (0...10 V signal)
PS_Out_Bus_V_m_r	Real	DCL Input Bus V - Slope of Scale Line
PS_Out_Bus_V_n_r	Real	DCL Input Bus V - Origin of Scale Line
PS_Out_Bus_I_m_r	Real	DCL Input Bus I - Slope of Scale Line
PS_Out_Bus_I_n_r	Real	DCL Input Bus I - Origin of Scale Line

Tabla 40. Variables de salida del bloque de pretratamiento DCL_MC.

DCL_MC Outputs		
Name	Type	Description
DCL_In_Bus_Voltage_r	Real	DCL Input bus voltage (V)
DCL_In_Bus_Current_r	Real	DCL Input bus current (A)
DCL_In_Bus_Power_r	Real	DCL Input bus power (W)
DCL_System_Off_n	Bool	DCL Off
DCL_System_On_n	Bool	DCL On

Tabla 41. Variables de entrada del bloque de control y comando DCL_CC.

DCL_CC Inputs		
Name	Type	Description
DCL_P_Set_r	Real	DCL Input bus power setpoint (V)
DCL_P_Set_Rate_r	Real	DCL Input bus power setpoint variation rate (V/s)
DCL_P_Set_Max_r	Real	DCL Maximum input bus power setpoint (V)
DCL_P_Set_m_r	Real	DCL Input bus power - Slope of scale line
DCL_P_Set_n_r	Real	DCL Input bus power - Origin of scale line
DCL_Set_Reset_n	Bool	DCL Setpoint reset

Tabla 42. Variables de salida del bloque de control y comando DCL_CC.

PS_CC Outputs		
Name	Type	Description
SA7_C0_Value	Integer	Analog Output 7 Channel 0 - DCL Input Power Setpoint (0...10 V signal)

4.5.8 Bloques de pretratamiento y comando para los circuitos de hidrógeno y de agua

El bloque de pretratamiento H2C_MC (*Hydrogen Circuit Measurement and Conditioning*), cuya interfaz se muestra en la Figura 71, se encarga de realizar el escalado de las señales analógicas procedentes de los transductores del circuito de hidrógeno, que son señales de intensidad de 4 a 20 mA, para la obtención de la temperatura y la presión relativa a la entrada de los tanques de hidruros metálicos, la presión a la entrada de la pila de hidrógeno, y el caudal de hidrógeno desde los tanques hacia la pila. En la Tabla 43 se describen sus variables de entrada, y en la Tabla 44 sus variables de salida.

Por su parte, el bloque de pretratamiento WC_MC (*Water Circuit Measurement and Conditioning*), cuya interfaz se muestra en la Figura 72, se encarga de realizar el escalado de las señales analógicas procedentes de los transductores del circuito de agua, que son también señales de intensidad de 4 a 20 mA, para la obtención de las temperaturas del agua a la entrada y a la salida de los tanques de hidruros metálicos, así como su caudal. En la Tabla 45 se describen sus variables de entrada, y en la Tabla 46 sus variables de salida.

El bloque de control y comando H2C_WC_CC (*Hydrogen & Water Circuits Command and Control*), cuya interfaz se muestra en la Figura 73, se encarga de gestionar la apertura y el cierre de las electroválvulas de los circuitos de hidrógeno y de agua, así como de analizar y notificar todas las condiciones de error y *warning* que puedan producirse en ambos sistemas. También, en este bloque se han implementado los controles por histéresis para la presión en el buffer de salida del electrolizador y para la presión del hidrógeno en el circuito.

El bloque procesa las órdenes de apertura y cierre de las electroválvulas, provenientes tanto del modo de funcionamiento manual como del modo de funcionamiento remoto, y en función de las condiciones de error y de los controles por histéresis pondrá a uno o a cero las correspondientes variables asociadas a los canales de salida digitales del PLC para finalmente abrir o cerrar las electroválvulas. En el caso de la electroválvula FY01, que está situada a la salida del electrolizador, la apertura podrá realizarse siempre que lo permita el control por histéresis para la presión en el buffer de salida del electrolizador y no existan condiciones de fallo en los circuitos de hidrógeno y de agua. En el caso de la electroválvula FY05, la que permite la inyección de agua caliente en los tanques de hidruros para la descarga de hidrógeno, podrá abrirse siempre que lo permita el control por histéresis para la presión del hidrógeno en el circuito y no existan condiciones de fallo en los circuitos de hidrógeno y de agua. Para el resto de electroválvulas, la apertura podrá realizarse siempre que no se den condiciones de fallo en los circuitos de hidrógeno y de agua. Para los controles por histéresis pueden fijarse los valores de *threshold*, y se dispone de flags para habilitar o deshabilitar su acción. Para la notificación de errores y warnings, se dispone de un flag para indicar el estado de error de los circuitos, un registro de flags para errores y otro registro de flags para warnings. En la Tabla 47 se describen las variables de entrada de este bloque, y en la Tabla 48 sus variables de salida.

Los controles por histéresis han sido implementados en POU's específicas, que han sido incluidas en la programación del bloque H2C_WC_CC. En la Figura 74, se muestra la interfaz de la POU para el control por histéresis de la presión en el buffer de salida del electrolizador. Su código, escrito en *structured text*, es el siguiente:

```
if ((EZ_Buffer_Press >= EZ_Buffer_Press_hth) and (H2_EZ_Valv_n_in = true)) or ((EZ_Start_Stop_n = 0)
and (H2_EZ_Valv_n_in = true)) then

    H2_EZ_Valv_n_out := true;

elsif ((EZ_Buffer_Press <= EZ_Buffer_Press_lth) and (EZ_Start_Stop_n = 1)) or (H2_EZ_Valv_n_in = false)
then

    H2_EZ_Valv_n_out := false;

end_if;
```

En la Figura 75, se muestra la interfaz de la POU para el control por histéresis de la presión en el circuito de hidrógeno. Su código, escrito en *structured text*, es el siguiente:

```
if (H2C_Hydride_In_Press >= H2C_Hydride_In_Press_hth) or (H2_HW_Valv_n_in = false) then

    H2_HW_Valv_n_out := false;

elsif (H2C_Hydride_In_Press <= H2C_Hydride_In_Press_lth) and (H2_HW_Valv_n_in = true) then

    H2_HW_Valv_n_out := true;

end_if;
```

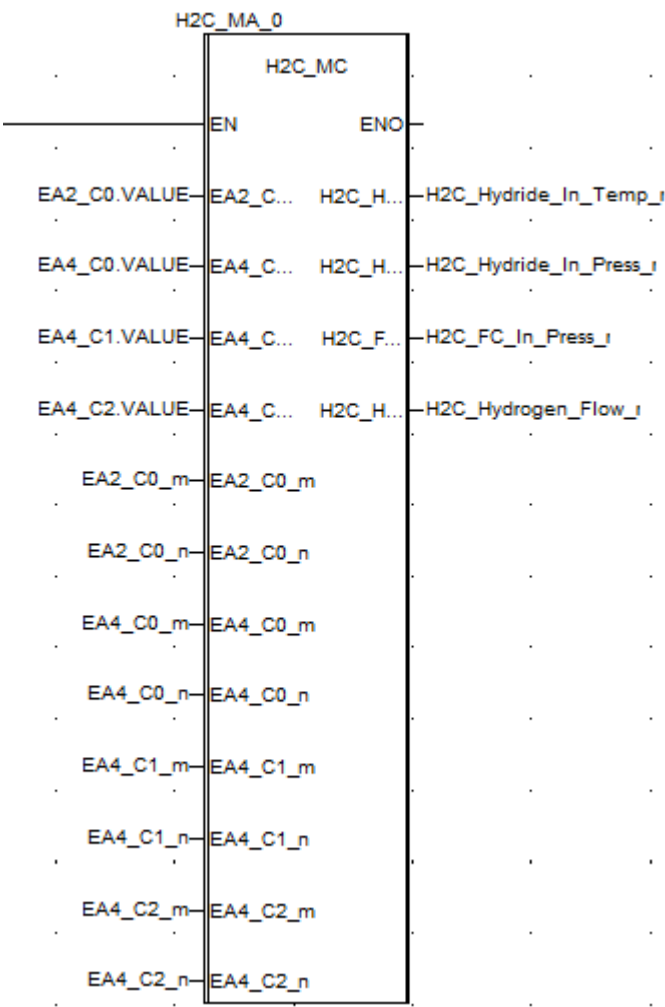


Figura 71. Interfaz del bloque de pretratamiento H2C_MC.

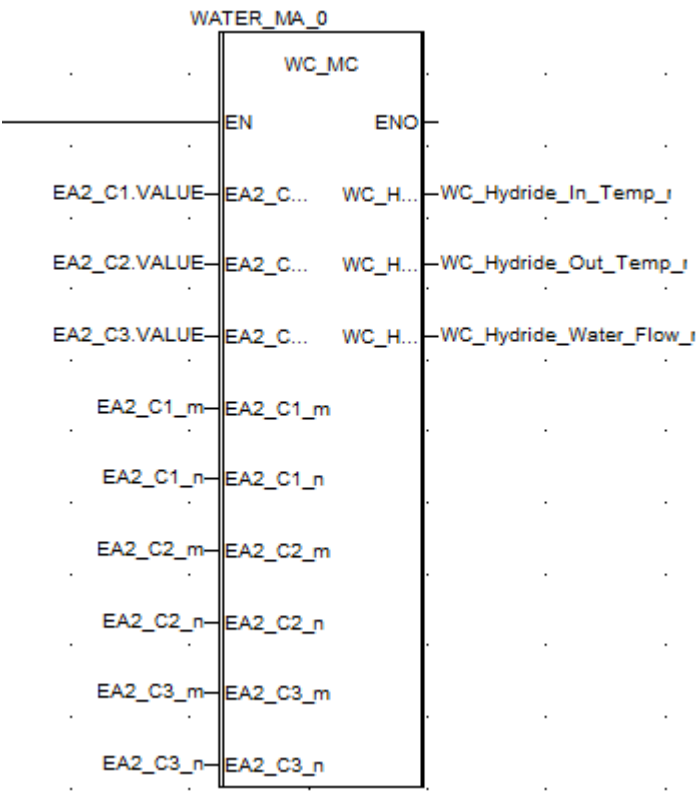


Figura 72. Interfaz del bloque de pretratamiento WC_MC.

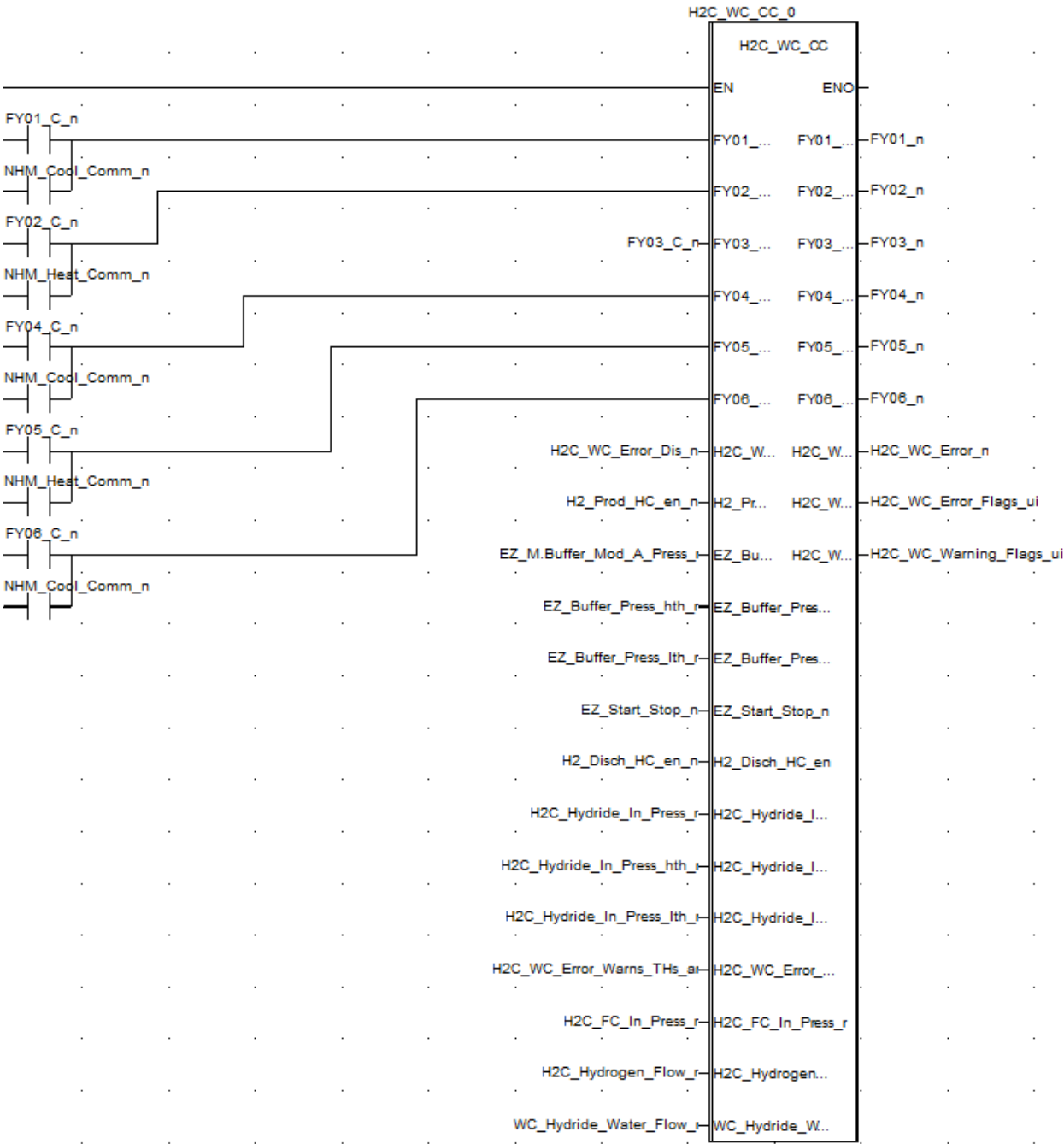


Figura 73. Interfaz del bloque de control y comando H2C_WC_CC.

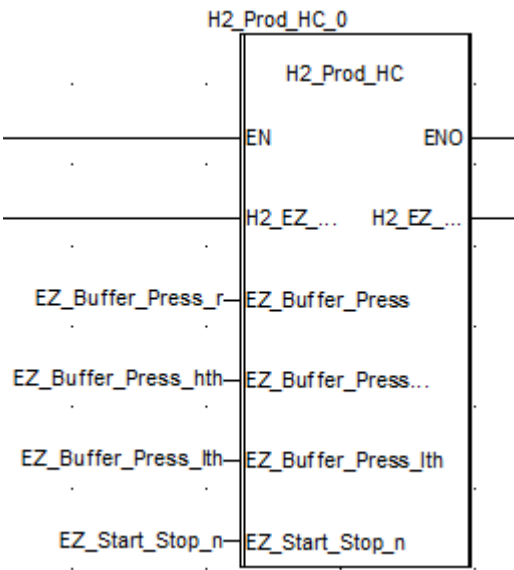


Figura 74. Interfaz del bloque para el control por histéresis de la presión en el buffer de salida del electrolizador.

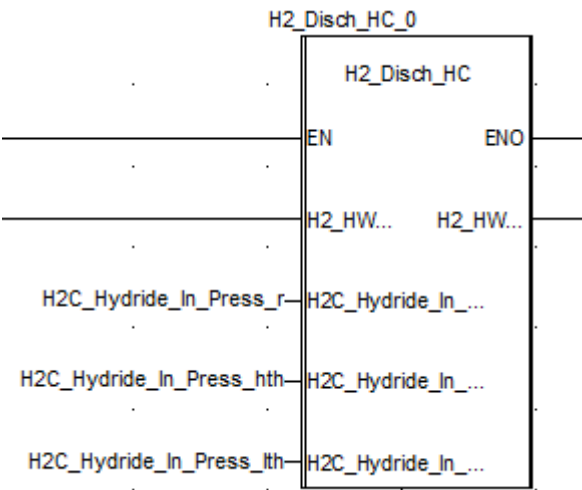


Figura 75. Interfaz del bloque para el control por histéresis de la presión en el circuito de hidrógeno.

Tabla 43. Variables de entrada del bloque de pretratamiento H2C_MC.

H2C_MC Inputs		
Name	Type	Description
EA2_C0_Value	Integer	Analog Input 2 Channel 0 - Hydride tanks input H2 temperature sensor
EA4_C0_Value	Integer	Analog Input 4 Channel 0 - Hydride tanks input H2 pressure sensor
EA4_C1_Value	Integer	Analog Input 4 Channel 1 - Fuel cell input H2 pressure sensor
EA4_C2_Value	Integer	Analog Input 4 Channel 2 - Hydride flow sensor
EA2_C0_m	Real	Hydride tanks input H2 temperature sensor - Slope of scale line
EA2_C0_n	Real	Hydride tanks input H2 temperature sensor - Origin of scale line
EA4_C0_m	Real	Hydride tanks input H2 pressure sensor - Slope of scale line
EA4_C0_n	Real	Hydride tanks input H2 pressure sensor - Origin of scale line
EA4_C1_m	Real	Fuel cell input H2 pressure sensor - Slope of scale line
EA4_C1_n	Real	Fuel cell input H2 pressure sensor - Origin of scale line
EA4_C2_m	Real	Hydrogen flow sensor - Slope of scale line
EA4_C2_n	Real	Hydrogen flow sensor - Origin of scale line

Tabla 44. Variables de salida del bloque de pretratamiento H2C_MC.

H2C_MC Outputs		
Name	Type	Description
H2C_Hydride_In_Temp_r	Real	Hydride tanks input H2 temperature (°C)
H2C_Hydride_In_Press_r	Real	Hydride tanks input H2 relative pressure (Bar)
H2C_FC_In_Press_r	Real	Fuel cell input H2 relative pressure (Barg)
H2C_Hydrogen_Flow_r	Real	Hydrogen flow rate (NL/min)

Tabla 45. Variables de entrada del bloque de pretratamiento WC_MC.

WC_MC Inputs		
Name	Type	Description
EA2_C1_Value	Integer	Analog Input 2 Channel 1 - Hydride input water temperature sensor
EA2_C2_Value	Integer	Analog Input 2 Channel 2 - Hydride output water temperature sensor
EA2_C3_Value	Integer	Analog Input 2 Channel 3 - Hydride water flow sensor
EA2_C1_m	Real	Hydride input water temperature sensor - Slope of scale line
EA2_C1_n	Real	Hydride input water temperature sensor - Origin of scale line
EA2_C2_m	Real	Hydride output water temperature sensor - Slope of scale line
EA2_C2_n	Real	Hydride output water temperature sensor - Origin of scale line
EA2_C3_m	Real	Hydride water flow sensor - Slope of scale line
EA2_C3_n	Real	Hydride water flow sensor - Origin of scale line

Tabla 46. Variables de salida del bloque de pretratamiento WC_MC.

WC_MC Outputs		
Name	Type	Description
WC_Hydride_In_Temp_r	Real	Hydride input water temperature (°C)
WC_Hydride_Out_Temp_r	Real	Hydride output water temperature (°C)
WC_Hydride_Water_Flow_r	Real	Hydride water flow sensor (L/s)

Tabla 47. Variables de entrada del bloque de control y comando H2C_WC_CC.

H2C_WC_CC Inputs		
Name	Type	Description
FY01_Command_n	Bool	FY01 H2 from electrolyzer valve - Command signal
FY02_Command_n	Bool	FY02 H2 to fuel cell valve - Command signal
FY03_Command_n	Bool	FY03 Inertization valve - Command signal
FY04_Command_n	Bool	FY04 H2 from bullets valve - Command signal
FY05_Command_n	Bool	FY05 Hot water valve - Command signal
FY06_Command_n	Bool	FY06 Cold water valve - Command signal
H2C_WC_Error_Dis_n	Bool	H2C WC Error disabling signal (1 error disabled, 0 error enabled)
H2_Prod_HC_en_n	Bool	Hysteresis Control for H2 production enabling (1 enabled, 0 disabled)
EZ_Buffer_Press_r	Real	Electrolyzer buffer pressure (bar)
EZ_Buffer_Press_hth	Real	Electrolyzer buffer pressure high threshold to Hysteresis Control (bar)
EZ_Buffer_Press_lth	Real	Electrolyzer buffer pressure low threshold to Hysteresis Control (bar)
EZ_Start_Stop_n	Bool	Electrolyzer Start/Stop command signal
H2_Disch_HC_en_n	Bool	Hysteresis Control for hydride tanks discharge enabling (1 enabled, 0 disabled)
H2C_Hydride_In_Press_r	Real	Hydride tanks input H2 relative pressure (Bar)
H2C_Hydride_In_Press_hth	Real	Hydride tanks input H2 relative pressure high threshold to Hysteresis Control (bar)
H2C_Hydride_In_Press_lth	Real	Hydride tanks input H2 relative pressure low threshold to Hysteresis Control (bar)
H2C_WC_Error_Warn_THs_ar	Array of real	H2C WC Thresholds for Error and Warning conditions
H2C_WC_Error_Warn_THs_ar[1]	Real	H2 Circuit overpressure threshold (Bar)
H2C_WC_Error_Warn_THs_ar[2]	Real	H2 Circuit leakage threshold (NI/min)
H2C_WC_Error_Warn_THs_ar[3]	Real	H2 Circuit overflow threshold (NI/s)
H2C_WC_Error_Warn_THs_ar[4]	Real	Water circuit obstruction threshold (L/s)
H2C_WC_Error_Warn_THs_ar[5]	Real	Water circuit leakage threshold (L/s)
H2C_WC_Error_Warn_THs_ar[6]	Real	Water circuit overflow threshold (L/s)
H2C_WC_Error_Warn_THs_ar[7]	Real	H2 Circuit overpressure threshold (Bar)
H2C_WC_Error_Warn_THs_ar[8]	Real	H2 Circuit overflow threshold (NI/s)
H2C_WC_Error_Warn_THs_ar[9]	Real	FC Inlet overpressure (Bar)
H2C_WC_Error_Warn_THs_ar[10]	Real	FC Inlet subpressure (Bar)
H2C_FC_In_Press_r	Real	FC Input H2 relative pressure (Barg)
H2C_Hydrogen_Flow_r	Real	Hydrogen flow (NI/s)
WC_Hydride_Water_Flow_r	Real	Hydride water flow sensor (L/s)

Tabla 48. Variables de salida del bloque de control y comando H2C_WC_CC.

H2C_WC_CC Outputs		
Name	Type	Description
FY01_OC_n	Bool	FY01 H2 from electrolyzer valve - Open/Closure signal
FY02_OC_n	Bool	FY02 H2 to fuel cell valve - Open/Closure signal
FY03_OC_n	Bool	FY03 Inertization valve - Open/Closure signal
FY04_OC_n	Bool	FY04 H2 from bullets valve - Open/Closure signal
FY05_OC_n	Bool	FY05 Hot water valve - Open/Closure signal
FY06_OC_n	Bool	FY06 Cold water valve - Open/Closure signal
H2C_WC_Error_n	Bool	H2C WC Error state
H2C_WC_Error_Flags_ui	Unsigned integer	H2C WC Error Flags
H2C_WC_Warning_Flags_ui	Unsigned integer	H2C WC Warning Flags

4.5.9 Bloque de pretratamiento para el stack de baterías de plomo (PB)

El bloque de pretratamiento PB_MC (*Lead-Acid battery Measurement and Conditioning*), cuya interfaz se muestra en la Figura 76, realiza una estimación del estado de carga del stack de baterías de plomo, en función de la tensión y del balance de intensidades en el bus principal de la Microrred. En la Tabla 49 se describen sus variables de entrada, y en la Tabla 50 sus variables de salida.

El SOC es estimado mediante la siguiente fórmula:

$$SOC = SOC_0 + \int_{t_0}^t i_{pb} \cdot dt$$

donde el estado de carga inicial, SOC_0 , es calculado como el producto de la resistencia de SOC por la carga máxima de la batería ($SOC_0 = R_{SOC} \cdot Q_{max}$), y la intensidad como la resultante de la suma de las intensidades de todos los dispositivos conectados al bus principal de la Microrred.

La resistencia de SOC, R_{SOC} , es calculada a partir de la tensión interna del stack, $U_{internal}$, de la siguiente forma:

$$R_{SOC} = 14.79 \frac{1}{V} \cdot U_{internal} - 650.96$$

La tensión interna del stack, $U_{internal}$, es estimada a partir de la tensión en el bus principal de la Microrred y la resistencia interna del stack de la siguiente forma:

$$U_{internal} = U_{bus} - R_{internal} \cdot i_{pb}$$

La resistencia interna del stack tiene un valor de 0.08053035Ω , que ha sido obtenido a partir de ensayos. Obviamente, la intensidad del stack empleada en esta última fórmula es obtenida a partir del balance de intensidades en el bus principal de la Microrred.

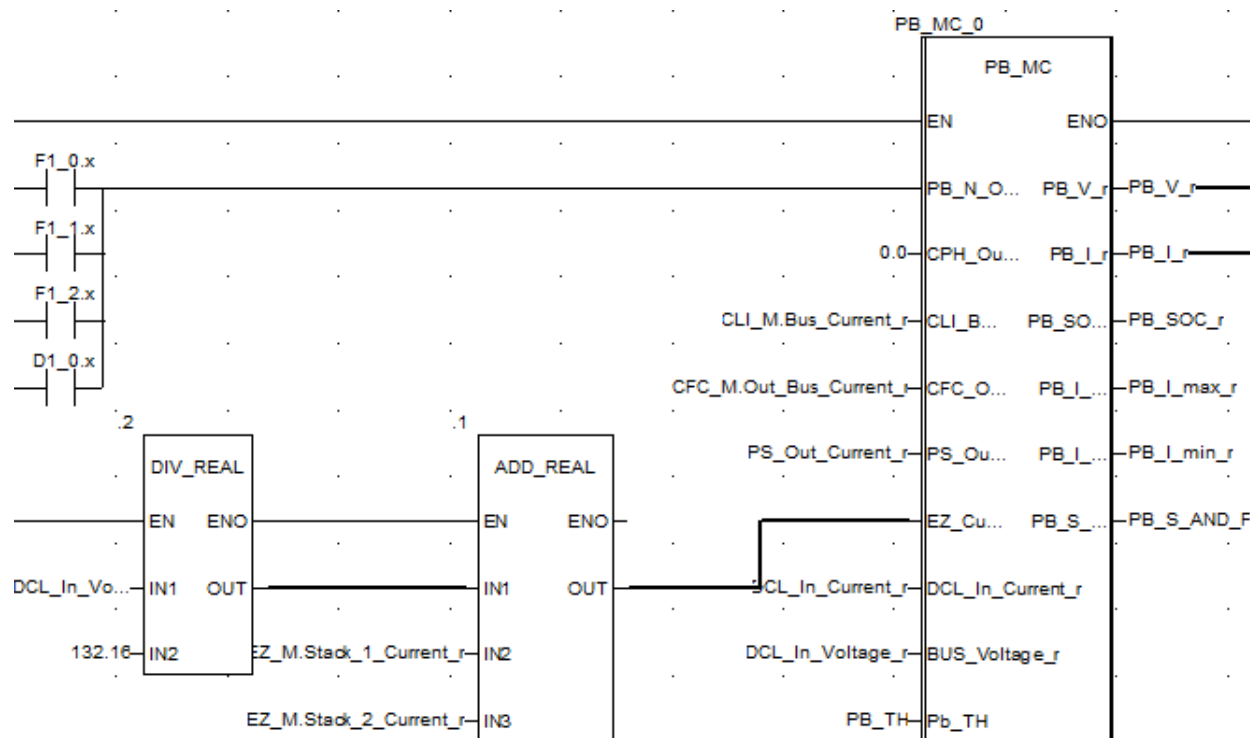


Figura 76. Bloque de pretratamiento PB_MC.

Tabla 49. Variables de entrada del bloque de pretratamiento PB_MC.

PB_MC Inputs		
Name	Type	Description
PB_N_Operation_n	Bool	Lead battery normal operation state
CPH_Out_Bus_Current_r	Real	CPH Output bus current (A)
CLI_Bus_Current_r	Real	CLI bus current (A)
CFC_Out_Bus_Current_r	Real	CFC output bus current (A)
PS_Out_Current_r	Real	PS output current (A)
EZ_Current_r	Real	EZ input current (A)
DCL_In_Current_r	Real	DCL input current (A)
BUS_Voltage_r	Real	DC bus voltage (V)
Pb_TH	Lead TH Struct	Lead battery thresholds for warnings and errors
Pb_TH.Stack_Volt_hwth_r	Real	Stack voltage high warning threshold (V)
Pb_TH.Stack_Volt_lwth_r	Real	Stack voltage low warning threshold (V)
Pb_TH.Stack_Volt_heth_r	Real	Stack voltage high error threshold (V)
Pb_TH.Stack_Volt_leth_r	Real	Stack voltage low error threshold (V)
Pb_TH.SOC_hwth_r	Real	SOC high warning threshold (%)
Pb_TH.SOC_lwth_r	Real	SOC low warning threshold (%)
Pb_TH.SOC_heth_r	Real	SOC high error threshold (%)
Pb_TH.SOC_leth_r	Real	SOC low error threshold (%)

Tabla 50. Variables de salida del bloque de pretratamiento PB_MC.

PB_MC Outputs		
Name	Type	Description
PB_V_r	Real	PB Stack estimated voltage (V)
PB_I_r	Real	PB Stack estimated current (A)
PB_SOC_r	Real	PB Stack estimated SOC (%)
PB_I_max_r	Real	PB Stack maximum allowable current (A)
PB_I_min_r	Real	PB Stack minimum allowable current (A)
PB_S_AND_F	Lead_SF Struct	PB States and Flags
PB_S_AND_F.Error_n	Bool	PB Error state
PB_S_AND_F.Warning_Flags_ui	Unsigned integer	PB Warning flags
PB_S_AND_F.Error_Flags_ui	Unsigned integer	PB Error flags

4.5.10 Bloque de pretratamiento para los tanques de hidruros metálicos

El bloque de pretratamiento NHM_MC (*Nitrure Hydride Manganese tank Measurement and Conditioning*), cuya interfaz se muestra en la Figura 77, se encarga de estimar el nivel de llenado de los tanques de hidruros. Contiene un modelo matemático desarrollado por el Departamento de Termotecnia de la Universidad de Sevilla, cuya divulgación no está permitida. En la Tabla 51 se describen sus variables de entrada, y en la Tabla 52 sus variables de salida.

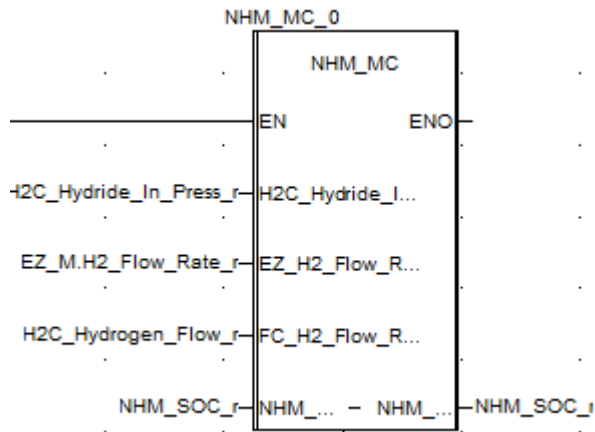


Figura 77. Interfaz del bloque de pretratamiento NHM_MC.

Tabla 51. Variables de entrada del bloque de pretratamiento NHM_MC.

NHM_MC Inputs		
Name	Type	Description
H2C_Hydride_In_Press_r	Real	Unknown
EZ_H2_Flow_Rate_nlh_r	Real	Unknown
FC_H2_Flow_Rate_nlm_r	Real	Unknown

Tabla 52. Variables de salida del bloque de pretratamiento NHM_MC.

NHM_MC Outputs		
Name	Type	Description
NHM_SOC_r	Real	Hydride tanks level of charge (%)

4.6 Mapas de variables para la monitorización y comando general de la Microrred desde el *First Level Controller*

Una vez definidos todos los bloques de pretratamiento y de control y comando necesarios, y después de incluirlos en la programación del *First Level Controller*, era necesario crear un conjunto de variables para recopilar todas las medidas de magnitudes, indicaciones ó códigos de estados y registros de flags generadas por los bloques de pretratamiento, asociadas a sus salidas, para que puedan ser utilizados en los diferentes modos de operación que se han definido para la Microrred, y también para la monitorización desde cualquier HMI o desde niveles de control superiores. Este conjunto de variables puede ser considerado como un **Mapa para la Monitorización** de la Microrred (desde Tabla 53 hasta Tabla 58).

Por otro lado, también era necesario crear otro conjunto de variables para la escritura de comandos y valores de setpoint para los equipos y sistemas de la Microrred desde los diferentes modos de operación, y asociarlas a las entradas de los correspondientes bloques de control y comando. Este otro conjunto de variables podría considerarse como el **Mapa para el Comando General** de la Microrred (Tabla 59).

Tabla 53. Mapa de Monitorización de la Microrred desde el FLC (parte 1).

Variable	Type	Units	Description
A1.x	BOOL	-	Operation Mode A1 - Stop
BUS_V_max_r	REAL	Volt	Bus - Maximum Bus Voltage
BUS_V_min_r	REAL	Volt	Bus - Minimum Bus Voltage
CFC_M.In_Bus_Voltage_r	REAL	Volts	DC/DC to H2 Fuel Cell - Input Bus Voltage (V)
CFC_M.In_Bus_Current_r	REAL	Amps	DC/DC to H2 Fuel Cell - Input Bus Current (A)
CFC_M.In_Bus_Power_r	REAL	Watts	DC/DC to H2 Fuel Cell - Input Bus Power (W)
CFC_M.Out_Bus_Voltage_r	REAL	Volts	DC/DC to H2 Fuel Cell - Output Bus Voltage (V)
CFC_M.Out_Bus_Current_r	REAL	Amps	DC/DC to H2 Fuel Cell - Output Bus Current (A)
CFC_M.Out_Bus_Power_r	REAL	Watts	DC/DC to H2 Fuel Cell - Output Bus Power (W)
CFC_M.In_Bus_Power_Set_r	REAL	Watts	DC/DC to H2 Fuel Cell - Input Bus Power Setpoint Received (W)
CFC_M.Est_Perform_r	REAL	p.u.	DC/DC to H2 Fuel Cell - Estimated Performance (p.u)
CFC_S_AND_F.System_State_ui	UINT16	-	DC/DC to H2 Fuel Cell - Status Register
CFC_S_AND_F.System_Standby_n	BOOL	-	DC/DC to H2 Fuel Cell - Standby State
CFC_S_AND_F.System_Init_CM_n	BOOL	-	DC/DC to H2 Fuel Cell - Initializing Current Mode State
CFC_S_AND_F.System_Init_PM_n	BOOL	-	DC/DC to H2 Fuel Cell - Initializing Power Mode State
CFC_S_AND_F.System_Run_CM_n	BOOL	-	DC/DC to H2 Fuel Cell - Running in Current Mode State
CFC_S_AND_F.System_Run_PM_n	BOOL	-	DC/DC to H2 Fuel Cell - Running in Power Mode State
CFC_S_AND_F.System_Error_n	BOOL	-	DC/DC to H2 Fuel Cell - Error State
CFC_S_AND_F.Error_Flags_1_ui	UINT16	-	DC/DC to H2 Fuel Cell - Error Flags Register 1
CFC_S_AND_F.Error_Flags_2_ui	UINT16	-	DC/DC to H2 Fuel Cell - Error Flags Register 2
CLI_M.Bat_Voltage_r	REAL	Volts	DC/DC to Lithium Battery Stack - Battery Voltage (V)
CLI_M.Bat_Current_r	REAL	Amps	DC/DC to Lithium Battery Stack - Battery Current (A)
CLI_M.Bat_Power_r	REAL	Watts	DC/DC to Lithium Battery Stack - Battery Power (W)
CLI_M.Bus_Voltage_r	REAL	Volts	DC/DC to Lithium Battery Stack - Bus Voltage (V)
CLI_M.Bus_Current_r	REAL	Amps	DC/DC to Lithium Battery Stack - Bus Current (A)
CLI_M.Bus_Power_r	REAL	Watts	DC/DC to Lithium Battery Stack - Bus Power (W)
CLI_M.Performance_r	REAL	p.u.	DC/DC to Lithium Battery Stack - Performance (p.u)
CLI_M.Coils_Temperature_r	REAL	°C	DC/DC to Lithium Battery Stack - Coils Temperature (°C)
CLI_M.IGBTs_Temperature_r	REAL	°C	DC/DC to Lithium Battery Stack - IGBTs Temperature (°C)
CLI_M.Bat_DC_Link_Voltage_r	REAL	Volts	DC/DC to Lithium Battery Stack - Battery DC Link Capacitor Voltage (V)
CLI_M.Bus_DC_Link_Voltage_r	REAL	Volts	DC/DC to Lithium Battery Stack - Bus DC Link Capacitor Voltage (V)
CLI_S_AND_F.System_State_ui	UINT16	-	DC/DC to Lithium Battery Stack - System State Register
CLI_S_AND_F.Syst_Wait_Starting_n	BOOL	-	DC/DC to Lithium Battery Stack - Waiting for Starting command
CLI_S_AND_F.Syst_Wait_V_bat_V_bus_n	BOOL	-	DC/DC to Lithium Battery Stack - Waiting for Battery Voltage and Bus Voltage
CLI_S_AND_F.Syst_Precharge_n	BOOL	-	DC/DC to Lithium Battery Stack - Precharging

Tabla 54. Mapa de Monitorización de la Microrred desde el FLC (parte 2).

Variable	Type	Units	Description
CLI_S_AND_F.Syst_Run_n	BOOL	-	DC/DC to Lithium Battery Stack - Running
CLI_S_AND_F.Syst_Standby_n	BOOL	-	DC/DC to Lithium Battery Stack - Standby State
CLI_S_AND_F.Syst_Error_n	BOOL	-	DC/DC to Lithium Battery Stack - Error State
CLI_S_AND_F.System_Prot_Flags_ui	UINT16	-	DC/DC to Lithium Battery Stack - Protection Flags Register
CLI_S_AND_F.System_Error_Flags_ui	UINT16	-	DC/DC to Lithium Battery Stack - Error Flags Register
D1_0.x	BOOL	-	Operation Mode D1.0 - Emergency Stopping Sequence
D1_0_End	BOOL	-	End Signal for Operation Mode D1.0
D1_1.x	BOOL	-	Operation Mode D1.1 - Emergency State
D1_2.x	BOOL	-	Operation Mode D1.2 - Diagnosis
DCL_In_Current_r	REAL	Amps	Programmable DC Load - Input Bus Current (A)
DCL_In_Power_r	REAL	Watts	Programmable DC Load - Input Bus Power (W)
DCL_In_Voltage_r	REAL	Volts	Programmable DC Load - Input Bus Voltage (V)
EM_STOP	BOOL	-	Emergency Stop Push
ERROR	BOOL	-	Error Condition
EZ_Buffer_Press_hth_r	REAL	Bar	Electrolyzer Buffer Pressure High Threshold to Hysteresis Control (bar)
EZ_Buffer_Press_lth_r	REAL	Bar	Electrolyzer Buffer Pressure Low Threshold to Hysteresis Control (bar)
EZ_M.Stack_1_Voltage_r	REAL	Volt	Electrolyzer - Stack 1 Voltage (V)
EZ_M.Stack_1_Current_r	REAL	Amp	Electrolyzer - Stack 1 Current (A)
EZ_M.Stack_2_Voltage_r	REAL	Volt	Electrolyzer - Stack 2 Voltage (V)
EZ_M.Stack_2_Current_r	REAL	Amp	Electrolyzer - Stack 2 Current (A)
EZ_M.Mod_A_Power_r	REAL	Watt	Electrolyzer - Module A Power Consumption (W)
EZ_M.Stacks_Mod_A_Press_r	REAL	Bar	Electrolyzer - Module A Stacks Pressure (bar)
EZ_M.Buffer_Mod_A_Press_r	REAL	Bar	Electrolyzer - Module A Buffer Pressure (bar)
EZ_M.Output_Press_r	REAL	Bar	Electrolyzer - Output Pressure (bar)
EZ_M.H2_Flow_Rate_r	REAL	NI/h	Electrolyzer - Hydrogen Flow Rate Production (NI/h)
EZ_M.Water_Mod_A_Temp_r	REAL	°C	Electrolyzer - Module A Water Temperature (°C)
EZ_M.Dryer_Pressure_r	REAL	Bar	Electrolyzer - Dryer Pressure (bar)
EZ_M.Dryer_Temp_Sensor_0_r	REAL	°C	Electrolyzer - Dryer Temperature Sensor 0 (°C)
EZ_M.Dryer_Temp_Sensor_1_r	REAL	°C	Electrolyzer - Dryer Temperature Sensor 1 (°C)
EZ_M.Q_Prod_Cycles_Stack_1_ui	UINT16	-	Electrolyzer - Quantity of Stack 1 Production Cycles
EZ_M.Q_Prod_Cycles_Stack_2_ui	UINT16	-	Electrolyzer - Quantity of Stack 2 Production Cycles
EZ_S_AND_F.System_State_ui	UINT16	-	Electrolyzer - System State Register
EZ_S_AND_F.Syst_Power_On_n	BOOL	-	Electrolyzer - Power On State
EZ_S_AND_F.Syst_Stand_By_n	BOOL	-	Electrolyzer - Standby State
EZ_S_AND_F.Syst_Ramp_Up_n	BOOL	-	Electrolyzer - Ramp Up
EZ_S_AND_F.Syst_Steady_n	BOOL	-	Electrolyzer - Steady
EZ_S_AND_F.Syst_Ramp_Down_n	BOOL	-	Electrolyzer - Ramp Down
EZ_S_AND_F.Syst_Purge_n	BOOL	-	Electrolyzer - Purge
EZ_S_AND_F.Syst_Heating_n	BOOL	-	Electrolyzer - Heating

Tabla 55. Mapa de Monitorización de la Microrred desde el FLC (parte 3).

Variable	Type	Units	Description
EZ_S_AND_F.Syst_Error_n	BOOL	-	Electrolyzer - Error State
EZ_S_AND_F.System_Substate_ui	UINT16	-	Electrolyzer - System Substate Register
EZ_S_AND_F.Syst_Wait_Start_Com_n	BOOL	-	Electrolyzer - Waiting for Start Command
EZ_S_AND_F.Syst_Wait_Pw_Cond_n	BOOL	-	Electrolyzer - Waiting for Power Condition
EZ_S_AND_F.Syst_Delay_DCDC_n	BOOL	-	Electrolyzer - Delay for DC/DC
EZ_S_AND_F.Syst_Ramp_Down_Ph1_n	BOOL	-	Electrolyzer - Ramp Down Phase 1
EZ_S_AND_F.Syst_Ramp_Down_Ph2_n	BOOL	-	Electrolyzer - Ramp Down Phase 2
EZ_S_AND_F.Syst_Next_SS_Sel_n	BOOL	-	Electrolyzer - Next Substatus Selection
EZ_S_AND_F.Syst_Alarm_Low_Water_n	BOOL	-	Electrolyzer - Alarm low water
EZ_S_AND_F.Syst_Alarm_High_Temp_n	BOOL	-	Electrolyzer - Alarm high temperature
EZ_S_AND_F.Syst_Alarm_Low_Temp_n	BOOL	-	Electrolyzer - Alarm low temperature
EZ_S_AND_F.Syst_Alarm_Low_Bat_n	BOOL	-	Electrolyzer - Alarm low battery
EZ_S_AND_F.Dryer_State_ui	UINT16	-	Electrolyzer - Dryer State Register
EZ_S_AND_F.Dryer_Standby_n	BOOL	-	Electrolyzer - Dryer Standby State
EZ_S_AND_F.Dryer_0_n	BOOL	-	Electrolyzer - Dryer 0
EZ_S_AND_F.Dryer_1_n	BOOL	-	Electrolyzer - Dryer 1
EZ_S_AND_F.Dryer_Leak_Test_n	BOOL	-	Electrolyzer - Dryer Leak Test
EZ_S_AND_F.Dryer_Substate_ui	UINT16	-	Electrolyzer - Dryer Substate Register
EZ_S_AND_F.System_Warning_Flags_ui	UINT16	-	Electrolyzer - Warning Flags Register
EZ_S_AND_F.System_Error_Flags_ui	UINT16	-	Error Flags Register
EZ_S_AND_F.Dryer_Error_Flags_ui	UINT16	-	Electrolyzer - Dryer Error Flags Register
F1_0.x	BOOL	-	Operation Mode F1.0 - Standby
F1_1.x	BOOL	-	Operation Mode F1.1 - Remote Function
F1_2.x	BOOL	-	Operation Mode F1.2 - Manual Function
F2.x	BOOL	-	Operation Mode F2 - Starting Process
F2_End	BOOL	-	End Signal for Operation Mode F2
F3.x	BOOL	-	Operation Mode F3 - Stopping Process
F3_End	BOOL	-	End Signal for Operation Mode F3
FC_M.system_Voltage_r	REAL	Volt	Fuel Cell - System Voltage (V)
FC_M.System_Current_r	REAL	Amp	Fuel Cell - System Current Self consumption (A)
FC_M.System_Pressure_r	REAL	Bar	Fuel Cell - System Pressure (bar)
FC_M.Stack_Voltage_r	REAL	Volt	Fuel Cell - Stack Voltage (V)
FC_M.Stack_Current_r	REAL	Amp	Fuel Cell - Stack Current (A)
FC_M.Stack_Temperature_r	REAL	°C	Fuel Cell - Stack Temperature (°C)
FC_M.H2_Inlet_Pressure_r	REAL	Bar	Fuel Cell - H2 Inlet Pressure (bar)
FC_M.H2_Concentration_r	REAL	ppm	Fuel Cell - H2 Concentration (ppm)
FC_M.Ambient_Temperature_r	REAL	°C	Fuel Cell - Ambient Temperature (°C)
FC_M.Fan_Speed_r	REAL	rpm	Fuel Cell - Fan Speed (rpm)
FC_S_AND_F.System_State_ui	UINT16	-	Fuel Cell - System State Register
FC_S_AND_F.System_Init_n	BOOL	-	Fuel Cell - Initializing State
FC_S_AND_F.System_Off_n	BOOL	-	Fuel Cell - Off State

Tabla 56. Mapa de Monitorización de la Microrred desde el FLC (parte 4).

Variable	Type	Units	Description
FC_S_AND_F.System_Standby_n	BOOL	-	Fuel Cell - Standby State
FC_S_AND_F.System_Start_n	BOOL	-	Fuel Cell - Starting State
FC_S_AND_F.System_Run_n	BOOL	-	Fuel Cell - Running State
FC_S_AND_F.System_Cat_Clean_n	BOOL	-	Fuel Cell - Catalyst Clean
FC_S_AND_F.System_Shutdown_n	BOOL	-	Fuel Cell - Shutdown
FC_S_AND_F.System_Error_n	BOOL	-	Fuel Cell - Error State
FC_S_AND_F.Warning_Flags_1_ui	UINT16	-	Fuel Cell - Warning Flags Register 1
FC_S_AND_F.Warning_Flags_2_ui	UINT16	-	Fuel Cell - Warning Flags Register 2
FC_S_AND_F.Error_Flags_1_ui	UINT16	-	Fuel Cell - Error Flags Register 1
FC_S_AND_F.Error_Flags_2_ui	UINT16	-	Fuel Cell - Error Flags Register 2
FC_S_AND_F.Error_Flags_3_ui	UINT16	-	Fuel Cell - Error Flags Register 3
FC_S_AND_F.Error_Flags_4_ui	UINT16	-	Fuel Cell - Error Flags Register 4
FC_S_AND_F.Info_Flags_ui	UINT16	-	Fuel Cell - Information Flags Register
FY01_C_n	BOOL	-	FY01 H2 from Electrolyzer Valve - Command signal
FY01_n	BOOL	-	FY01 H2 from Electrolyzer Valve - Open/Closure signal
FY02_C_n	BOOL	-	FY02 H2 to Fuel Cell Valve - Command signal
FY02_n	BOOL	-	FY02 H2 to Fuel Cell Valve - Open/Closure signal
FY03_C_n	BOOL	-	FY03 Inertization Valve - Command signal
FY03_n	BOOL	-	FY03 Inertization Valve - Open/Closure signal
FY04_C_n	BOOL	-	FY04 H2 from Bullets Valve - Command signal
FY04_n	BOOL	-	FY04 H2 from Bullets Valve - Open/Closure signal
FY05_C_n	BOOL	-	FY05 Hot Water Valve - Command signal
FY05_n	BOOL	-	FY05 Hot Water Valve - Open/Closure signal
FY06_C_n	BOOL	-	FY06 Cold Water Valve - Command signal
FY06_n	BOOL	-	FY06 Cold Water Valve - Open/Closure signal
H2_Disch_HC_en_n	BOOL	-	Hysteresis Control for Hydride Tanks Discharge enabling (1 enabled / 0 disabled)
H2_Prod_HC_en_n	BOOL	-	Hysteresis Control for H2 Production enabling (1 enabled / 0 disabled)
H2C_FC_In_Press_r	REAL	Barg	H2 Circuit - Fuel Cell Input H2 Relative Pressure (Barg)
H2C_FC_In_Press_TH_r	REAL	Barg	H2 Circuit - Fuel Cell Input H2 Relative Pressure Threshold to FC Starting (Barg)
H2C_Hydride_In_Press_hth_r	REAL	Barg	H2 Circuit - Hydride Tanks Input H2 Relative Pressure Hight Threshold to Hysteresis Control (Barg)
H2C_Hydride_In_Press_lth_r	REAL	Barg	H2 Circuit - Hydride Tanks Input H2 Relative Pressure Low Threshold to Hysteresis Control (Barg)
H2C_Hydride_In_Press_r	REAL	Barg	H2 Circuit - Hydride Tanks Input H2 Relative Pressure (Barg)
H2C_Hydride_In_Temp_r	REAL	°C	H2 Circuit - Hydride Tanks Input H2 Temperature (°C)
H2C_Hydrogen_Flow_r	REAL	NI/s	H2 Circuit - Hydrogen Flow (NI/s)
H2C_WC_Error_Flags_ui	UINT16	-	H2 & Water Circuits - Error Flags
H2C_WC_Error_n	UINT16	-	H2 & Water Circuits - Error State
H2C_WC_Warning_Flags_ui	UINT16	-	H2 & Water Circuits - Warning Flags

Tabla 57. Mapa de Monitorización de la Microrred desde el FLC (parte 5).

Variable	Type	Units	Description
H2C_WC_Error_n	UINT16	-	H2 & Water Circuits - Error State
H2C_WC_Warning_Flags_ui	UINT16	-	H2 & Water Circuits - Warning Flags
LI_M.Stack_Volt_r	REAL	Volt	Lithium Battery - Stack Voltage (V)
LI_M.Stack_Current_r	REAL	Amp	Lithium Battery - Stack Current (A)
LI_M.Stack_SOC_r	REAL	%	Lithium Battery - State of Charge (%)
LI_M.Cell_Avg_Volt_r	REAL	Volt	Lithium Battery - Average cell voltage (V)
LI_M.Cell_Max_Volt_r	REAL	Volt	Lithium Battery - Highest cell voltage (V)
LI_M.Index_Cell_Max_V_ui	UINT16	-	Lithium Battery - Index number of the cell with highest voltage
LI_M.Cell_Min_Volt_r	REAL	Volt	Lithium Battery - Lowest cell voltage (V)
LI_M.Index_Cell_Min_V_ui	UINT16	-	Lithium Battery - Index number of the cell with lowest voltage
LI_M.Cell_Avg_Temp_r	REAL	°C	Lithium Battery - Average cell temperature (°C/°F)
LI_M.Cell_Max_Temp_r	REAL	°C	Lithium Battery - Highest cell temperature (°C/°F)
LI_M.Index_Cell_Max_T_ui	UINT16	-	LI_Index_Cell_Max_T_ui
LI_M.Cell_Volts_ar[1]	REAL	Volt	Lithium Battery - Cell 1 Voltage
LI_M.Cell_Volts_ar[2]	REAL	Volt	Lithium Battery - Cell 2 Voltage
LI_M.Cell_Volts_ar[3]	REAL	Volt	Lithium Battery - Cell 3 Voltage
LI_M.Cell_Volts_ar[4]	REAL	Volt	Lithium Battery - Cell 4 Voltage
LI_M.Cell_Volts_ar[5]	REAL	Volt	Lithium Battery - Cell 5 Voltage
LI_M.Cell_Volts_ar[6]	REAL	Volt	Lithium Battery - Cell 6 Voltage
LI_M.Cell_Volts_ar[7]	REAL	Volt	Lithium Battery - Cell 7 Voltage
LI_M.Cell_Volts_ar[8]	REAL	Volt	Lithium Battery - Cell 8 Voltage
LI_M.Cell_Volts_ar[9]	REAL	Volt	Lithium Battery - Cell 9 Voltage
LI_M.Cell_Volts_ar[10]	REAL	Volt	Lithium Battery - Cell 10 Voltage
LI_M.Cell_Volts_ar[11]	REAL	Volt	Lithium Battery - Cell 11 Voltage
LI_M.Cell_Volts_ar[12]	REAL	Volt	Lithium Battery - Cell 12 Voltage
LI_M.Cell_Volts_ar[13]	REAL	Volt	Lithium Battery - Cell 13 Voltage
LI_M.Cell_Volts_ar[14]	REAL	Volt	Lithium Battery - Cell 14 Voltage
LI_M.Cell_Volts_ar[15]	REAL	Volt	Lithium Battery - Cell 15 Voltage
LI_M.Cell_Volts_ar[16]	REAL	Volt	Lithium Battery - Cell 16 Voltage
LI_M.Cell_Temps_ar[1]	REAL	°C	Lithium Battery - Cell 1 Temperature
LI_M.Cell_Temps_ar[2]	REAL	°C	Lithium Battery - Cell 2 Temperature
LI_M.Cell_Temps_ar[3]	REAL	°C	Lithium Battery - Cell 3 Temperature
LI_M.Cell_Temps_ar[4]	REAL	°C	Lithium Battery - Cell 4 Temperature
LI_M.Cell_Temps_ar[5]	REAL	°C	Lithium Battery - Cell 5 Temperature
LI_M.Cell_Temps_ar[6]	REAL	°C	Lithium Battery - Cell 6 Temperature
LI_M.Cell_Temps_ar[7]	REAL	°C	Lithium Battery - Cell 7 Temperature
LI_M.Cell_Temps_ar[8]	REAL	°C	Lithium Battery - Cell 8 Temperature
LI_M.Cell_Temps_ar[9]	REAL	°C	Lithium Battery - Cell 9 Temperature
LI_M.Cell_Temps_ar[10]	REAL	°C	Lithium Battery - Cell 10 Temperature

Tabla 58. Mapa de Monitorización de la Microrred desde el FLC (parte 6).

Variable	Type	Units	Description
LI_M.Cell_Temps_ar[11]	REAL	°C	Lithium Battery - Cell 11 Temperature
LI_M.Cell_Temps_ar[12]	REAL	°C	Lithium Battery - Cell 12 Temperature
LI_M.Cell_Temps_ar[13]	REAL	°C	Lithium Battery - Cell 13 Temperature
LI_M.Cell_Temps_ar[14]	REAL	°C	Lithium Battery - Cell 14 Temperature
LI_M.Cell_Temps_ar[15]	REAL	°C	Lithium Battery - Cell 15 Temperature
LI_M.Cell_Temps_ar[16]	REAL	°C	Lithium Battery - Cell 16 Temperature
LI_S_AND_F.Status_ui	UINT16	-	Lithium Battery - Status
LI_S_AND_F.N_Operation_n	BOOL	-	Lithium Battery - Normal Operation State
LI_S_AND_F.Error_n	BOOL	-	Lithium Battery - Error State
LI_S_AND_F.Warning_Flags_ui	UINT16	-	Lithium Battery - Warning Flags
LI_S_AND_F.Error_Flags_ui	UINT16	-	Lithium Battery - Error Flags
NHM_SOC_r	REAL	%	NHM Tank SOC (%).
PB_I_max_r	REAL	Amp	Lead Battery Stack Maximum Allowable Current (A)
PB_I_min_r	REAL	Amp	Lead Battery Stack Minimum Allowable Current (A)
PB_I_r	REAL	Amp	Lead Battery Stack Estimated Current (A)
PB_P_r	REAL	Watt	Lead Battery Stack Estimated Power (W)
PB_SOC_max_r	REAL	%	Lead Battery Stack Maximum SOC (%)
PB_SOC_min_r	REAL	%	Lead Battery Stack Minimum SOC (%)
PB_SOC_r	REAL	%	Lead Battery Stack Estimated SOC (%)
PB_V_max_r	REAL	Volt	Lead Battery Stack Maximum Voltage (V)
PB_V_min_r	REAL	Volt	Lead Battery Stack Minimum Voltage (V).
PB_V_r	REAL	Volt	Lead Battery Stack Estimated Voltage (V).
PS_ManStart_Mess_sig_n	BOOL	-	Prog. Power Supply - Manual Starting Message signal.
PS_Out_Current_r	REAL	Amp	Prog. Power Supply Output Bus Current (A)
PS_Out_Power_r	REAL	Watt	Prog. Power Supply Output Bus Power (W)
PS_Out_Voltage_r	REAL	Volt	Prog. Power Supply Output Bus Voltage (V)
WC_Hydride_In_Temp_r	REAL	°C	Hydride Input Water Temperature (°C)
WC_Hydride_Out_Temp_r	REAL	°C	Hydride Output Water Temperature (°C)
WC_Hydride_Water_Flow_r	REAL	l/s	Hydride Water Flow Sensor (L/s)

Tabla 59. Mapa de Comando General de la Microrred desde el FLC.

Variable	Type	Units	Description
CFC_PM_CM_Mode_Sel_n	BOOL	-	DC/DC Converter to H2 Fuel Cell Mode Selection (1=Current Mode / 0=Power Mode).
CFC_Power_Setpoint_r	REAL	Watt	DC/DC Converter to H2 Fuel Cell Output Bus Power Setpoint (W)
CFC_Rearm_n	BOOL	-	DC/DC Converter to H2 Fuel Cell Rearm Command.
CFC_Start_Stop_n	BOOL	-	DC/DC Converter to H2 Fuel Cell Start/Stop Command (1=Start/0=Stop).
CPH_Start_Stop_n	BOOL	-	DC/DC Converter to Photovoltaic Field Start/Stop Command (1=Start/0=Stop).
CLI_P_Set_i	INT16	Watt	DC/DC Conv. to Lithium B.S.- Power Setpoint (W).
CLI_Reset_SW_n	BOOL	-	DC/DC Conv. to Lithium B.S.- Software Reset signal.
CLI_Start_Stop_n	BOOL	-	DC/DC Conv. to Lithium B.S.- Start/Stop signal (1=Start/0=Stop).
DCL_P_Set_r	REAL	Watt	DC Prog. Load - Input Bus Power Setpoint (W)
EZ_P_Set_r	REAL	Watt	Electrolyzer Power Setpoint (W).
EZ_Rearm_n	BOOL	-	Electrolyzer Rearm Command.
EZ_Reset_n	BOOL	-	Electrolyzer Reset Command.
EZ_Start_Stop_n	BOOL	-	Electrolyzer Start/Stop Command (1=Start/0=Stop).
FC_Rearm_n	BOOL	-	H2 Fuel Cell Rearm Command.
FC_Start_Stop_n	BOOL	-	H2 Fuel Cell Start/Stop Command (1=Start/0=Stop).
FY01_C_n	BOOL	-	FY01 H2 from Electrolyzer Valve - Command signal
FY02_C_n	BOOL	-	FY02 H2 to Fuel Cell Valve - Command signal
FY03_C_n	BOOL	-	FY03 Inertization Valve - Command signal
FY04_C_n	BOOL	-	FY04 H2 from Bullets Valve - Command signal
FY05_C_n	BOOL	-	FY05 Hot Water Valve - Command signal
FY06_C_n	BOOL	-	FY06 Cold Water Valve - Command signal
PS_I_Set_r	REAL	Volt	Prog. Power Supply Output Bus Current Setpoint (A)
PS_V_Set_r	REAL	Amp	Prog. Power Supply Output Bus Voltage Setpoint (V)

4.7 Bloques de programa para la implementación de los modos de operación del First Level Controller

4.7.1 Bloque de programa para el estado de parada A1 Stop

El bloque de programa A1_STOP, cuya interfaz se muestra en la Figura 78, implementa el estado de parada inicial de la Microrred. Su ejecución es habilitada cuando se activa la etapa A1 del código SFC contenido en la sección OMM (*Operation Modes Management*).

Inicialmente, se planteó que el estado de parada no tuviese acciones de control asociadas. Sin embargo, debido a que algunos equipos se situaban en estado de error cuando eran encendidos, ha sido necesario incluir en este modo de operación el envío de comandos de rearme a todos los equipos de la Microrred.

El bloque A1_Stop toma a su entrada las señales de rearme del **Mapa de Comando para el Modo de Funcionamiento Manual**, que será definido y especificado más adelante, y copia sus estados en el Mapa de Comando General de la Microrred. El Mapa de Comando para el Modo de Funcionamiento Manual está asociado a los controles y elementos de las pantallas de explotación que integran el HMI del FLC, mediante los cuales el operador puede interactuar manualmente.

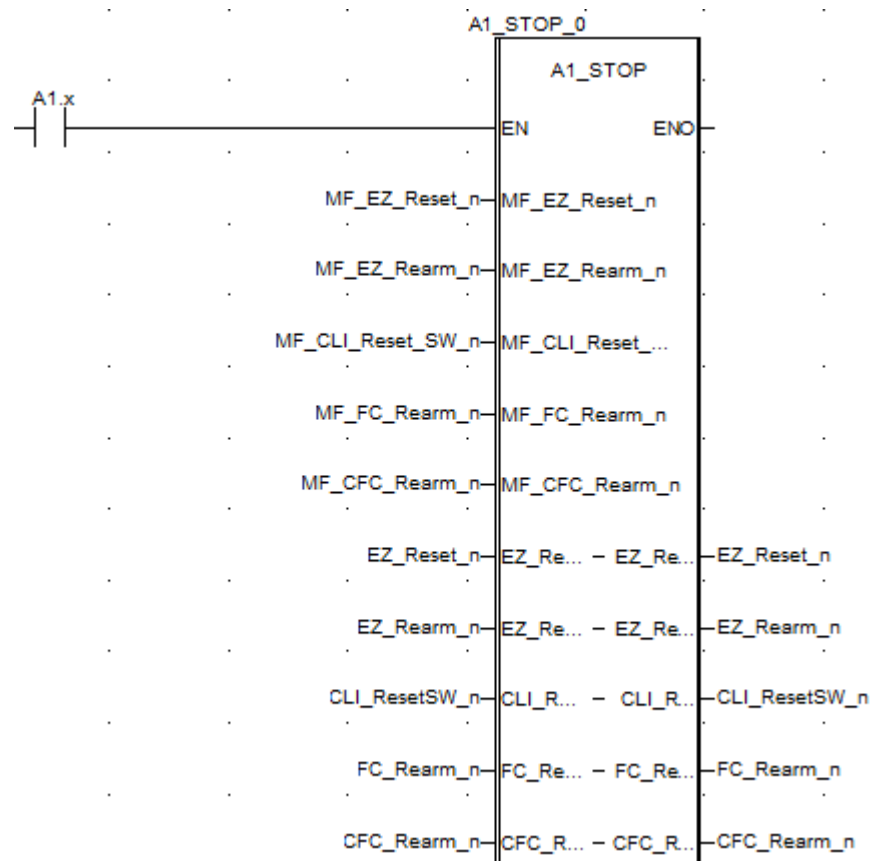


Figura 78. Interfaz del bloque de programa para el modo de operación A1 Stop.

4.7.2 Bloque de programa para la secuencia de puesta en marcha *F2 Starting Process*

El bloque de programa *F2_STARTING_PROCESS*, cuya interfaz se muestra en la Figura 79, implementa el proceso para la puesta en marcha de la Microrred. Su ejecución es habilitada cuando se activa la etapa F2 del código SFC contenido en la sección OMM (*Operation Modes Management*).

El proceso para la puesta en marcha de la Microrred está formado por la siguiente secuencia de acciones:

1. Inertización. Se ordena la apertura de la electroválvula FY03 para la inertización del circuito de hidrógeno mediante nitrógeno. Esta etapa dura 10 segundos.
2. Comprobación del cierre de la válvula de inertización FY03.
3. Comprobación de que el EMS del stack de baterías de litio se encuentra en el estado de operación normal.
4. Comprobación de que el convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio se encuentra en el estado de *standby*.
5. Envío de los parámetros de protección al convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio.
6. Comprobación de que la pila de hidrógeno se encuentra en el estado de *standby*.
7. Comprobación de que el convertidor DC/DC asociado a la pila de hidrógeno se encuentra en el estado de *standby*.
8. Comprobación de que la fuente de alimentación programable se encuentra encendida.
9. Comprobación de que la carga electrónica programable se encuentra encendida.

Las entradas y salidas del bloque *F2_STARTING_PROCESS* están directamente asociadas a los Mapas de Monitorización y de Comando General de la Microrred.

Una de las funcionalidades que deben ser implementadas en la programación del FLC es la opción de habilitar o deshabilitar los equipos y sistemas de la Microrred, para poder conseguir diferentes topologías o configuraciones. Esto se ha tenido en cuenta en la implementación de este modo de operación. Para ello, se ha definido un tipo de estructura denominada *Dis_Eq_Flgs*, que contiene un conjunto de variables booleanas que se emplean como flags para indicar la habilitación o deshabilitación de cada equipo. Se ha declarado una variable denominada *Dis* con dicha estructura (Figura 80), y se han cableado estos flags en paralelo con las variables de entrada de *F2_STARTING_PROCESS* que indican los estados de funcionamiento de los equipos, tal como se muestra en la Figura 79, para de esta manera poder realizar el proceso de puesta en marcha aún habiendo equipos deshabilitados en la Microrred. Por ejemplo, la variable *FC_S_AND_F.Syst_Standby_n*, que se emplea para indicar el estado de *standby* de la pila de hidrógeno, ha sido cableada en paralelo con el flag *Dis.FC*; de esta manera, cuando en el proceso de arranque se comprueba que la pila de hidrógeno se encuentre en el estado de *standby* (*FC_S_AND_F.Syst_Standby_n=1*), si dicho equipo está deshabilitado (*Dis.FC=1*) el bloque recibirá igualmente a través de la correspondiente entrada un valor *True*, y no se detendrá la ejecución de la secuencia.

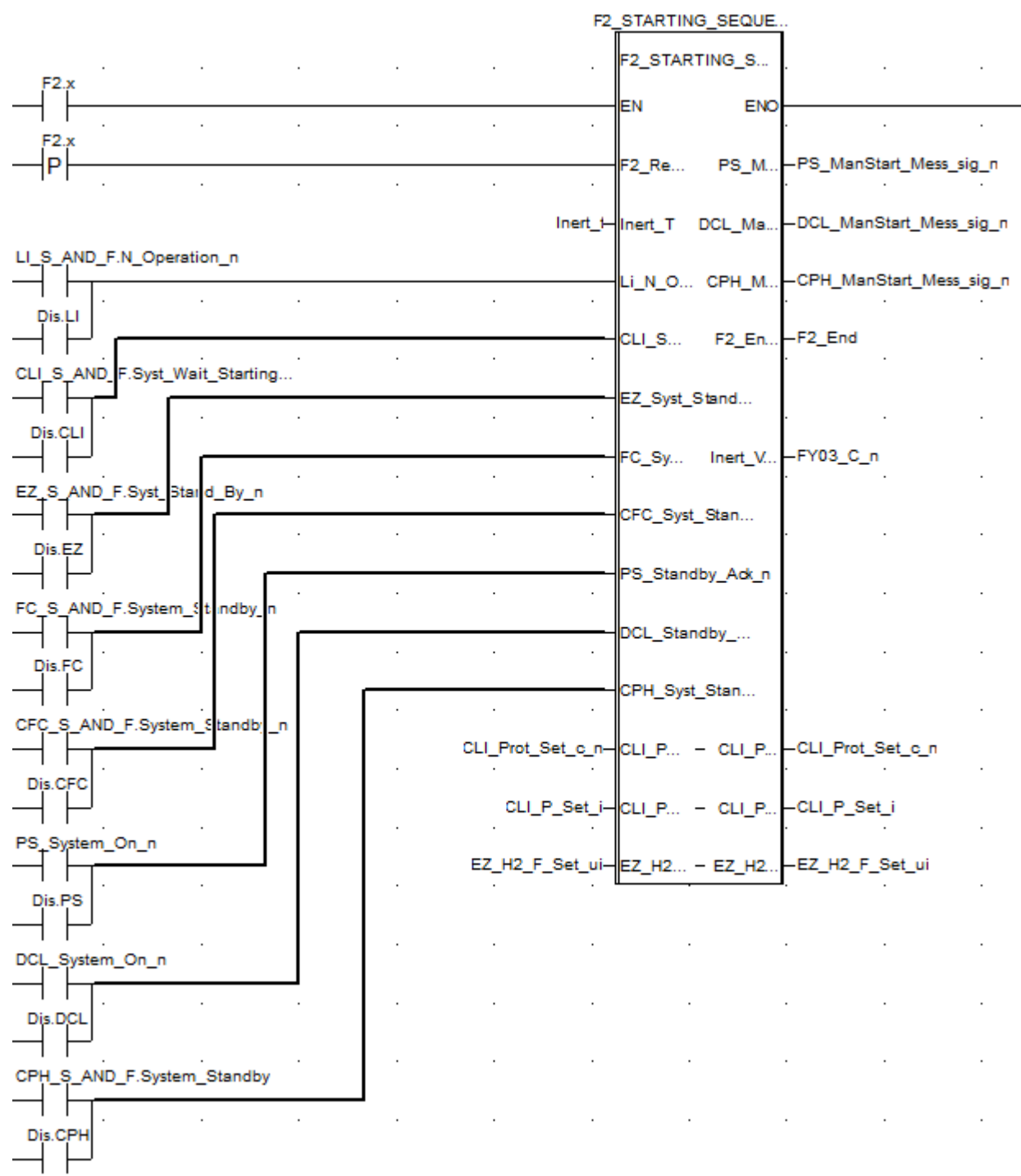


Figura 79. Interfaz del bloque de programa para el modo de operación *F2 Starting Process*.











 Dis	Dis_Eq_Flags	Disabling Equipment Flags.
 CPH	BOOL	Disabling of DC/DC to Photovoltaic Field (0=Enabled / 1=Disabled).
 PB	BOOL	Disabling of Lead Battery Stack (0=Enabled / 1=Disabled).
 LI	BOOL	Disabling of Lithium Battery Stack (0=Enabled / 1=Disabled).
 CLI	BOOL	Disabling of DC/DC Converter to Lithium Battery Stack (0=Enabled / 1=Disabled).
 EZ	BOOL	Disabling of Electrolyzer (0=Enabled / 1=Disabled).
 FC	BOOL	Disabling of H2 Fuel Cell (0=Enabled / 1=Disabled).
 CFC	BOOL	Disabling of DC/DC Converter to H2 Fuel Cell (0=Enabled / 1=Disabled).
 PS	BOOL	Disabling of Prog Power Supply (0=Enabled / 1=Disabled).
 DCL	BOOL	Disabling of DC Prog Load (0=Enabled / 1=Disabled).

Figura 80. Flags para habilitación y deshabilitación de equipos.

4.7.3 Bloques de programa para los modos de funcionamiento manual *F1.2 Manual Function* y diagnóstico y tratamiento de errores *D1.2 Diagnosis*

Los bloques de programa *F1_2_MF_1p* y *F1_2_MF_2p*, cuyas interfaces se muestran en la Figura 81 y en la Figura 82, implementan ambos tanto el Modo de Funcionamiento Manual como el Modo de Diagnóstico y Tratamiento de Errores de la Microrred. Su ejecución es habilitada cuando se activan la etapa *F1_2* y *D1_2* del código SFC contenido en la sección OMM (*Operation Modes Management*). Se han utilizado dos bloques de programa para la implementación de ambos modos de operación debido a los límites impuestos por Unity Pro en la cantidad de variables en los puertos de entrada y de salidas de las POUs.

El modo de funcionamiento manual dispone de su propio mapa de variables para el comando de la Microrred, que es el que se muestra en la Tabla 60. Este mapa de comandos está asociado a los controles y elementos del HMI que se ha implementado para el FLC, mediante los cuales el operador interactúa para el envío de comandos y valores de setpoint, y los valores que contiene son copiados en el Mapa de Comando General de la Microrred cuando este modo de operación está activo.

La variable *MF_EZ_Start_Stop_n*, por ejemplo, está asociada a un selector de marcha y parada de la pantalla de explotación correspondiente a la pila de hidrógeno (Figura 83). Mediante este selector, la variable se pone a uno para enviar una orden de arranque a la pila de hidrógeno, o a cero para enviar una orden de parada.

Como se verá más adelante, el modo de funcionamiento remoto dispone también de su propio mapa de variables de comando, que estarán asociadas al Segundo Nivel de Control. El uso de mapas de comando diferentes para cada modo de operación permite inhibir de manera efectiva las actuaciones de control de uno de los modos de funcionamiento cuando el otro modo de funcionamiento está activo.

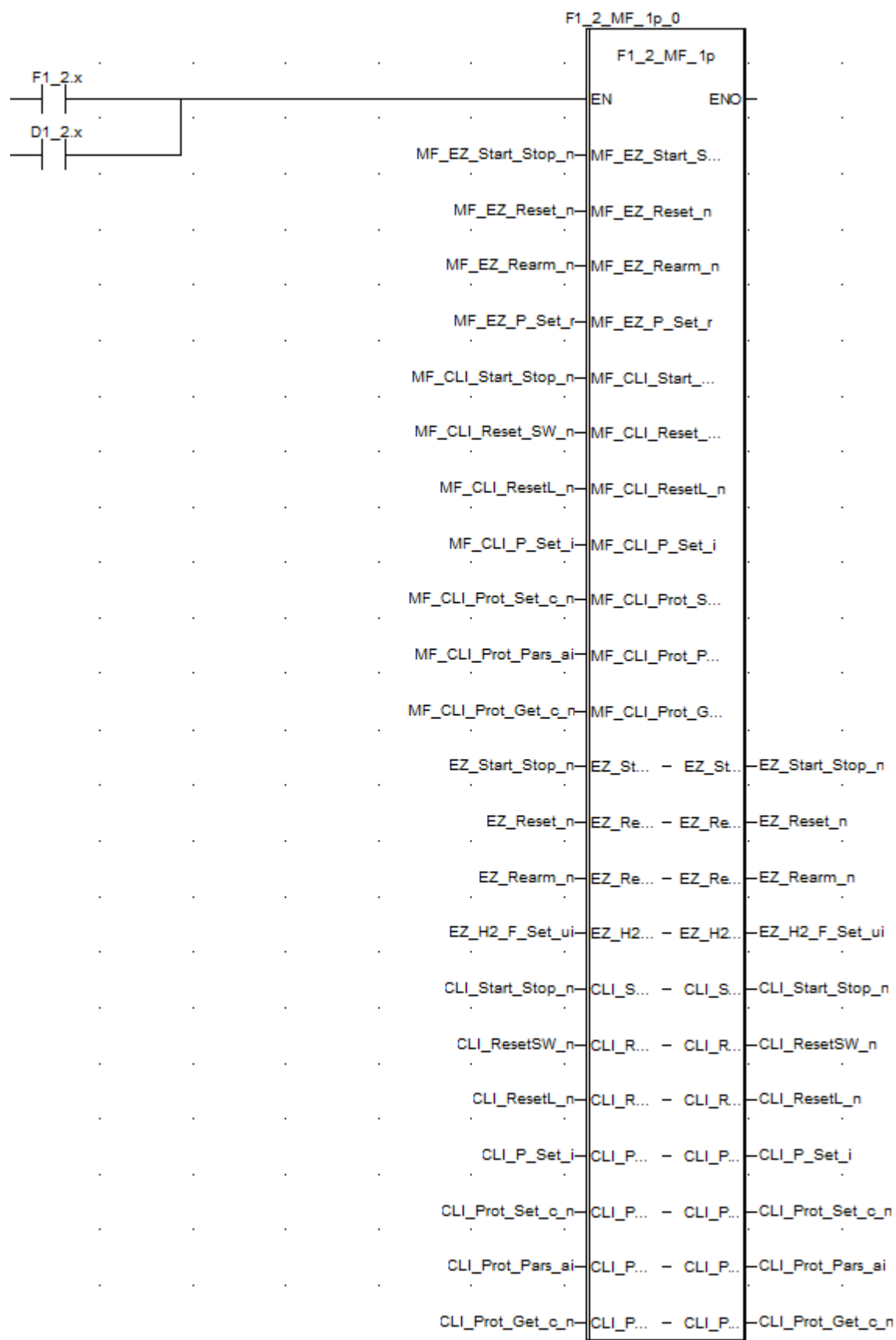


Figura 81. Interfaz del bloque de programa 1 para el modo de funcionamiento *F1.2 Manual Function*.

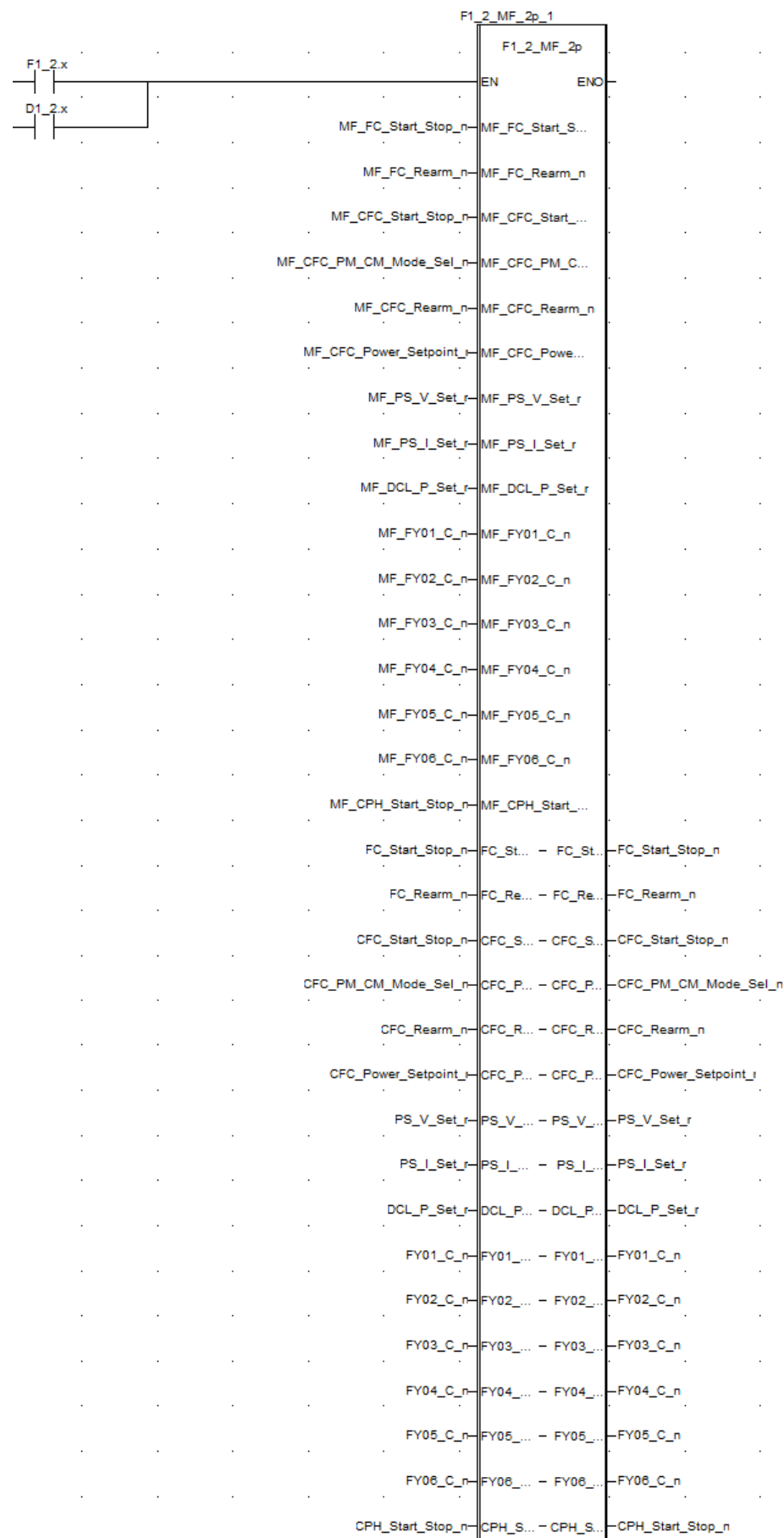


Figura 82. Interfaz del bloque de programa 2 para el modo de funcionamiento *F1.2 Manual Function*.

Tabla 60. Mapa de Comando del Modo de Funcionamiento Manual de la Microrred.

Variable	Type	Units	Description
MF_CFC_PM_CM_Mode_Sel_n	BOOL	-	Manual Function - DC/DC Converter to H2 Fuel Cell Mode Selection (1=Current Mode / 0=Power Mode).
MF_CFC_Power_Setpoint_r	REAL	Watt	Manual Function - DC/DC Converter to H2 Fuel Cell Output Bus Power Setpoint (W)
MF_CFC_Rearm_n	BOOL	-	Manual Function - DC/DC Converter to H2 Fuel Cell Rearm Command.
MF_CFC_Start_Stop_n	BOOL	-	Manual Function - DC/DC Converter to H2 Fuel Cell Start/Stop Command (1=Start/0=Stop).
MF_CPH_Start_Stop_n	BOOL	-	Manual Function - DC/DC Converter to Photovoltaic Field Start/Stop Command (1=Start/0=Stop).
MF_CLI_P_Set_i	INT16	Watt	Manual Function - DC/DC Conv. to Lithium B.S.- Power Setpoint (W).
MF_CLI_Reset_SW_n	BOOL	-	Manual Function - DC/DC Conv. to Lithium B.S.- Software Reset signal.
MF_CLI_Start_Stop_n	BOOL	-	Manual Function - DC/DC Conv. to Lithium B.S.- Start/Stop signal (1=Start/0=Stop).
MF_DCL_P_Set_r	REAL	Watt	Manual Function - DC Prog. Load - Input Bus Power Setpoint (W)
MF_EZ_P_Set_r	REAL	Watt	Manual Function - Electrolyzer Power Setpoint (W).
MF_EZ_Rearm_n	BOOL	-	Manual Function - Electrolyzer Rearm Command.
MF_EZ_Reset_n	BOOL	-	Manual Function - Electrolyzer Reset Command.
MF_EZ_Start_Stop_n	BOOL	-	Manual Function - Electrolyzer Start/Stop Command (1=Start/0=Stop).
MF_FC_Rearm_n	BOOL	-	Manual Function - H2 Fuel Cell Rearm Command.
MF_FC_Start_Stop_n	BOOL	-	Manual Function - H2 Fuel Cell Start/Stop Command (1=Start/0=Stop).
MF_FY01_C_n	BOOL	-	Manual Function - FY01 H2 from Electrolyzer Valve - Command signal
MF_FY02_C_n	BOOL	-	Manual Function - FY02 H2 to Fuel Cell Valve - Command signal
MF_FY03_C_n	BOOL	-	Manual Function - FY03 Inertization Valve - Command signal
MF_FY04_C_n	BOOL	-	Manual Function - FY04 H2 from Bullets Valve - Command signal
MF_FY05_C_n	BOOL	-	Manual Function - FY05 Hot Water Valve - Command signal
MF_FY06_C_n	BOOL	-	Manual Function - FY06 Cold Water Valve - Command signal
MF_PS_I_Set_r	REAL	Volt	Manual Function - Prog. Power Supply Output Bus Current Setpoint (A)
MF_PS_V_Set_r	REAL	Amp	Manual Function - Prog. Power Supply Output Bus Voltage Setpoint (V)



Figura 83. Controles para el envío de comandos a la pila de hidrógeno (FC) en el Modo de Funcionamiento Manual y en el modo D1.2 Diagnosis.

4.7.4 Bloques de programa para el modo de funcionamiento remoto *F1.1 Remote Function*

Los bloques de programa *F1_1_RF_1p* y *F1_1_RF_2p*, cuyas interfaces se muestran en la Figura 85, implementan ambos el Modo de Funcionamiento Remoto de la Microrred. Su ejecución es habilitada cuando se activa la etapa *F1_1* del código SFC contenido en la sección OMM (*Operation Modes Management*). Se han utilizado dos bloques de programa para la implementación de este modo de operación por el mismo motivo que los bloques para el modo de funcionamiento manual.

El modo de funcionamiento remoto dispone de su propio mapa de comando, que es el que se muestra en la Tabla 61. La gestión de la Microrred desde el Segundo Nivel de Control se realiza mediante un conjunto de variables para las consignas de potencia requeridas para los equipos que estén conectados al bus principal de la Microrred, a excepción de la fuente de alimentación programable, que emplea consignas de tensión e intensidad, y el convertidor DC/DC asociado al campo de paneles fotovoltaicos, que sólo dispone de comandos de arranque y parada. El arranque o la parada de cada equipo se realiza de manera automática cuando su consigna de potencia se encuentra por encima o por debajo de cierto valor umbral.

En el caso del convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (CLI), cuando la consigna de potencia recibida desde el SLC se encuentra por encima de los 10 W o por debajo de -10 W, primero se envía al convertidor una orden de arranque, y cuando se encuentra en el estado de *Running* se le envía la consigna que se ha recibido. Cuando la consigna de potencia recibida desde el SLC se encuentra entre los -10 W y los 10 W, primero se envía dicha consigna al convertidor, y cuando la potencia que se mide en su punto de conexión al bus principal alcanza dicho rango se envía la orden de parada.

En el caso de la fuente de alimentación programable, las consignas de tensión e intensidad recibidas desde el SLC son enviadas directamente. De manera análoga, en el caso de la carga electrónica programable la consigna de potencia recibida también se envía directamente.

En el caso del electrolizador (EZ), cuando se recibe desde el SLC una consigna de potencia por encima de los 600 W, se realiza la siguiente secuencia de acciones:

1. Se abren las electroválvulas FY01 y FY04 del circuito de hidrógeno, para permitir el paso del hidrógeno generado por el electrolizador a los tanques de hidruros metálicos.
2. Se abre la electroválvula FY06 del circuito de agua, para inyectar agua fría en los tanques de hidruros metálicos, para refrigerarlos durante el proceso de absorción.
3. Se envía una orden de arranque al electrolizador.
4. Cuando el electrolizador alcanza el estado *Steady*, se le envía la consigna de potencia recibida, debidamente convertida a porcentaje de caudal.

Y cuando la consigna de potencia recibida desde el SLC es inferior al valor umbral de 600 W, la secuencia que se realiza es esta otra:

1. Se envía al electrolizador la consigna de potencia recibida, debidamente convertida a porcentaje de caudal.
2. Una vez la producción de hidrógeno se establece en torno al valor de consigna enviado, se envía al electrolizador una orden de parada.
3. Cuando el electrolizador alcanza el estado de *Standby* y se despresuriza, se cierra las electroválvula FY06, para cortar la inyección de agua fría en los tanques de hidruros metálicos, y las electroválvulas FY01 y FY04 del circuito de hidrógeno.

En el caso del convertidor DC/DC asociado a la pila de hidrógeno (CFC), cuando se recibe desde el SLC una consigna de potencia por encima del valor umbral de 50 W, se realiza la siguiente secuencia de acciones:

1. Se abre la electroválvula FY02 del circuito de hidrógeno, para permitir el paso del hidrógeno desde los tanques de hidruros metálicos hacia la pila de hidrógeno.
2. Se abre la electroválvula FY05 del circuito de agua, para inyectar agua caliente en los tanques de hidruros metálicos, para realizar la desorción del hidrógeno.
3. Cuando la presión del hidrógeno a la entrada de la pila supera los 3 bares, se envía una orden de arranque a la pila de hidrógeno.
4. Una vez que la pila de hidrógeno alcanza el estado *Run*, se envía una orden de arranque a su convertidor DC/DC asociado.
5. Una vez el convertidor alcanza el estado *Run in Power Mode*, se le envía la consigna de potencia recibida.

Y cuando la consigna de potencia recibida desde el SLC es inferior al valor umbral de 50 W, la secuencia que se realiza es esta otra:

1. Se le envía al convertidor la consigna de potencia recibida.
2. Cuando la potencia que se mide en el bus de salida del convertidor desciende de dicho valor umbral, se envía al convertidor una orden de parada.
3. Una vez el convertidor alcanza el estado de *Standby*, se le envía a la pila de hidrógeno una orden de parada.
4. Una vez la pila de hidrógeno alcanza el estado de *Standby*, se cierra la electroválvula FY05 del circuito de agua, para cortar la inyección de agua caliente en los tanques de hidruros metálicos y detener la desorción del hidrógeno.
5. Por último, se cierra la electroválvula FY02 del circuito de hidrógeno.

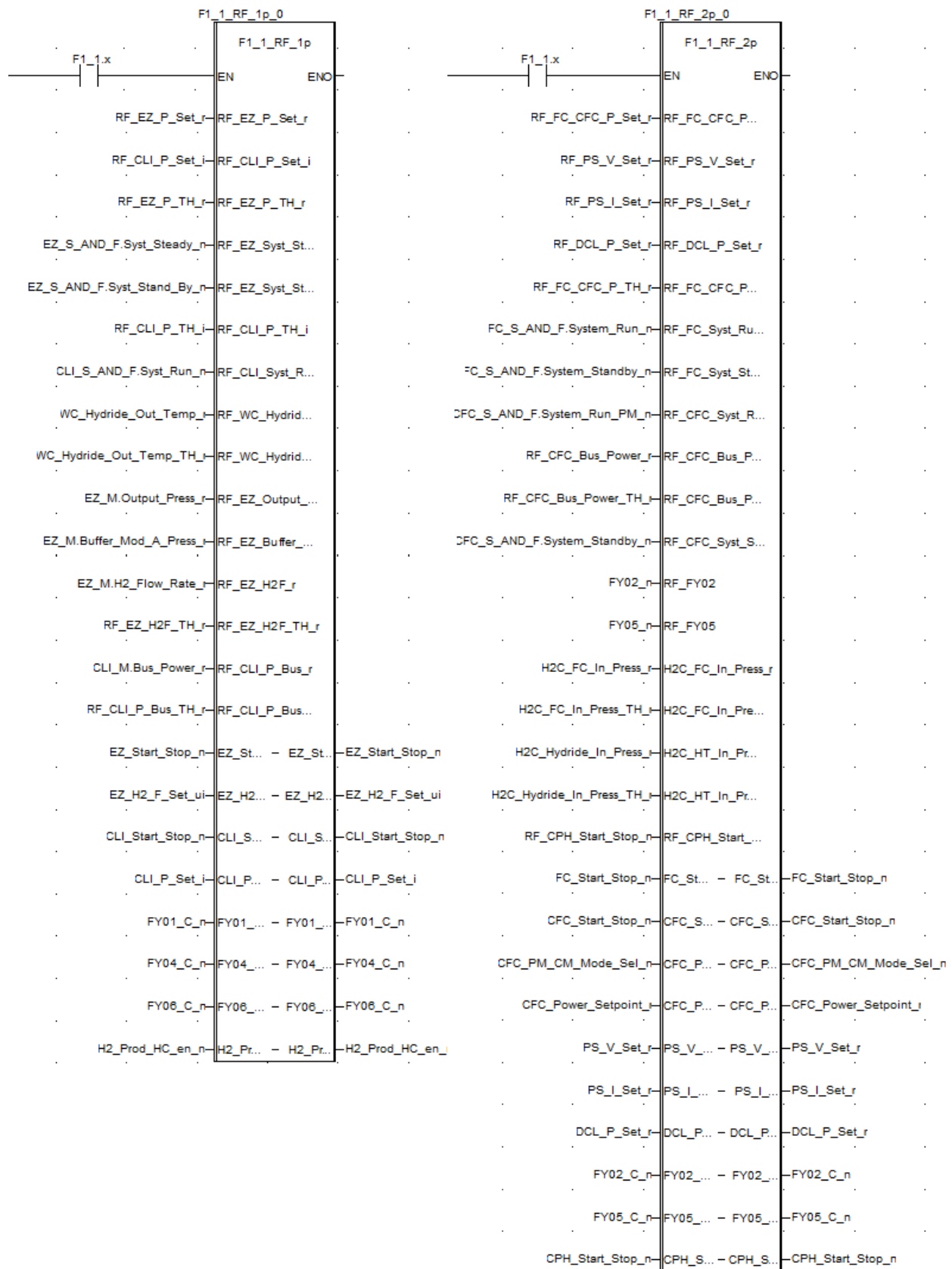


Figura 84. Interfaces de los bloques de programa para el modo de funcionamiento *F1.1 Remote Function*.

Tabla 61. Mapa de Comando del Modo de Funcionamiento Remoto.

Variable	Type	Units	Description
RF_CFC_Bus_Power_r	REAL	Watt	RF - DC/DC Converter to H2 Fuel Cell Output Bus Power Setpoint (W)
RF_CLI_P_Set_i	INT16	Watt	RF - DC/DC Conv. to Lithium B.S.- Power Setpoint (W).
RF_CPH_On_Off_n	BOOL	-	RF - DC/DC Conv. to Photovoltaic Field On/Off command (1=On/0=Off)
RF_DCL_P_Set_r	REAL	Watt	RF - DC Prog. Load - Input Bus Power Setpoint (W)
RF_EZ_P_Set_r	REAL	Watt	RF - Electrolyzer Power Setpoint (W).
RF_PS_I_Set_r	REAL	Volt	RF - Prog. Power Supply Output Bus Current Setpoint (A)
RF_PS_V_Set_r	REAL	Amp	RF - Prog. Power Supply Output Bus Voltage Setpoint (V)

4.7.5 Bloque de programa para la secuencia de parada *F3 Stopping Process*

El bloque de programa *F3_STOPPING_PROCESS*, cuya interfaz se muestra en la Figura 85, implementa el proceso de parada de la Microrred. Su ejecución es habilitada cuando se activa la etapa F3 del código SFC contenido en la sección OMM (*Operation Modes Management*).

El proceso de parada de la Microrred está formado por la siguiente secuencia de acciones:

1. Apagado del convertidor DC/DC asociado al campo de paneles fotovoltaicos. En esta etapa, se envía una orden de apagado a dicho equipo.
2. Corte de la inyección de potencia al bus principal desde la fuente de alimentación programable (PS). En esta etapa, se envían consignas de tensión e intensidad nulas a la fuente de alimentación programable, y se espera a que la potencia medida a su salida descienda de cierto valor umbral por debajo del cual puede considerarse cero.
3. Corte de la inyección de potencia al bus principal desde el convertidor DC/DC asociado a la pila de hidrógeno (CFC). En esta etapa, se envía una consigna de potencia cero al convertidor CFC, y se espera a que la potencia medida a su salida descienda de cierto valor umbral por debajo del cual puede considerarse cero.
4. Parada del convertidor DC/DC asociado a la pila de hidrógeno (CFC). En esta etapa, se envía una orden de parada al convertidor CFC, y se espera a que alcance el estado de *standby*.
5. Corte de la generación o absorción de potencia del convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (CLI). En esta etapa, se envía una consigna de potencia cero al convertidor CLI, y se espera a que la potencia medida en su conexión al bus de la Microrred se encuentre entre ciertos valores umbrales dentro de los cuales puede considerarse cero.
6. Parada del convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (CLI). En esta etapa, se envía una orden de parada al convertidor CLI, y se espera que alcance el estado de *standby*.
7. Corte de la absorción de potencia desde la carga electrónica programable (DCL). En esta etapa, se envía una consigna de potencia nula a la carga electrónica programable, y se espera a que la potencia medida a su salida descienda de cierto valor umbral por debajo del cual puede considerarse cero.
8. Puesta de la producción de hidrógeno en el electrolizador (EZ) al mínimo. En esta etapa, se envía al electrolizador su valor mínimo de consigna, que es de 150 NI/h, y se espera a que la producción de hidrógeno se establezca en dicho valor.
9. Parada del electrolizador (EZ). En esta etapa, se envía una orden de parada al electrolizador, y se espera a que alcance el estado de *standby*.
10. Cierre de las electroválvulas de los circuitos de hidrógeno y de agua.
11. Inertización. Se ordena la apertura de la electroválvula FY03 para la inertización del circuito de hidrógeno mediante nitrógeno. Esta etapa dura 10 segundos.

Las entradas y salidas del bloque *F3_STOPPING_PROCESS* están directamente asociadas a los Mapas de Monitorización y de Comando General de la Microrred desde el FLC.

Por último, en este modo de operación también se ha tenido en cuenta la deshabilitación de equipos, al igual que en el proceso de puesta en marcha.

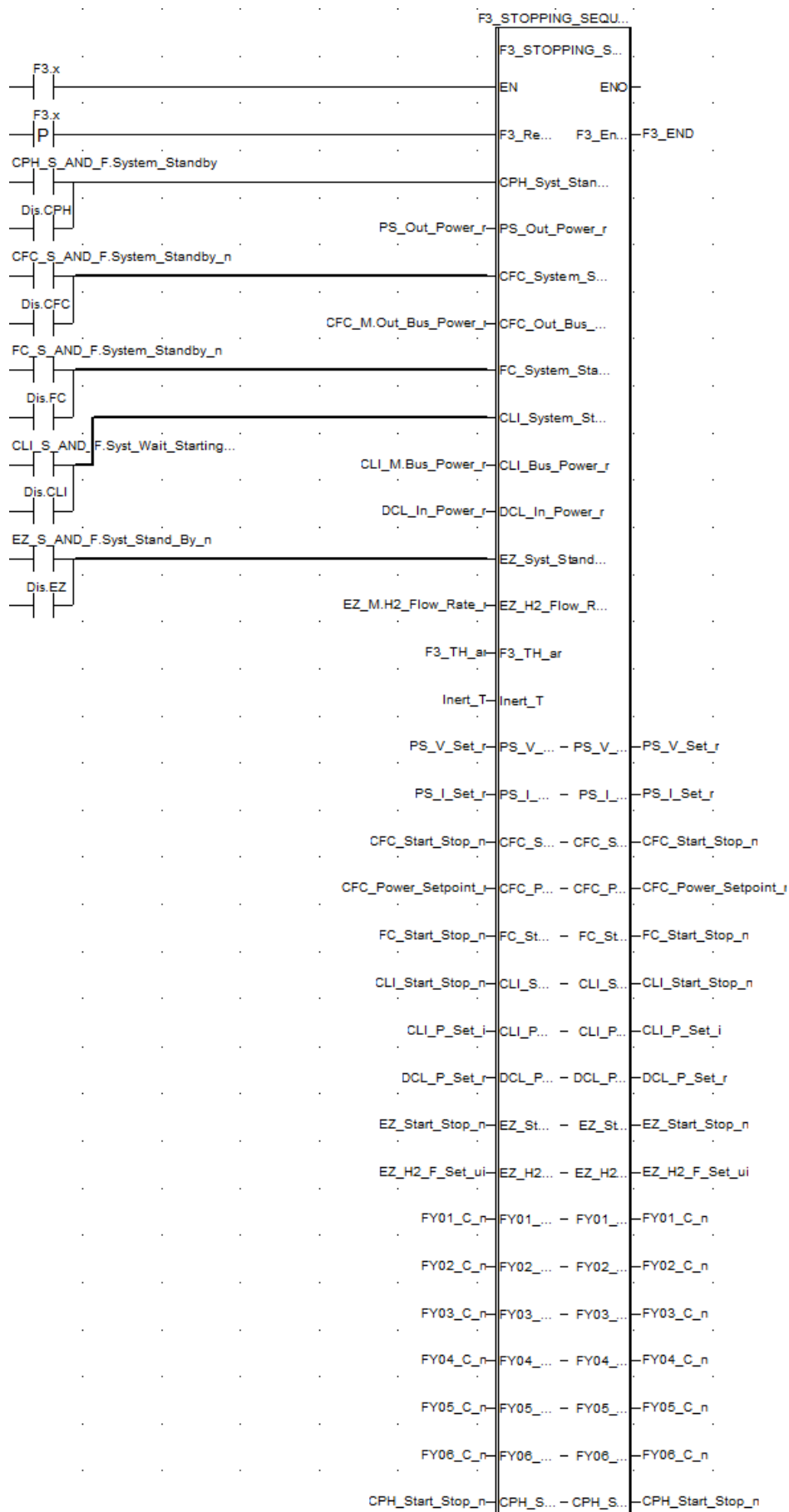


Figura 85. Interfaz el bloque de programa para el modo de operación *F3 Stopping Sequence*.

4.7.6 Bloque de programa para la secuencia de parada de emergencia *D1.0 Emergency Stop Sequence*

El bloque de programa *D1_0_EMER_STOPPING*, cuya interfaz se muestra en la Figura 86, implementa la parada de emergencia de la Microrred. Su ejecución es habilitada cuando se activa la etapa *D1_0* del código SFC contenido en la sección OMM (*Operation Modes Management*). Su código es exactamente el mismo que el del bloque *F3_STOPPING_PROCESS*, debido a que la parada de emergencia tiene la misma secuencia de acciones que el proceso de parada F3. En pro de simplificar la programación del FLC, este modo de operación podría haberse implementado con el mismo bloque *F3_STOPPING_PROCESS*; sin embargo, se ha decidido utilizar un bloque diferente para poder utilizar otros valores umbrales más generosos en la puesta a cero de las potencias generadas o absorbidas por los equipos, para poder completar la parada de la Microrred en un tiempo más reducido.

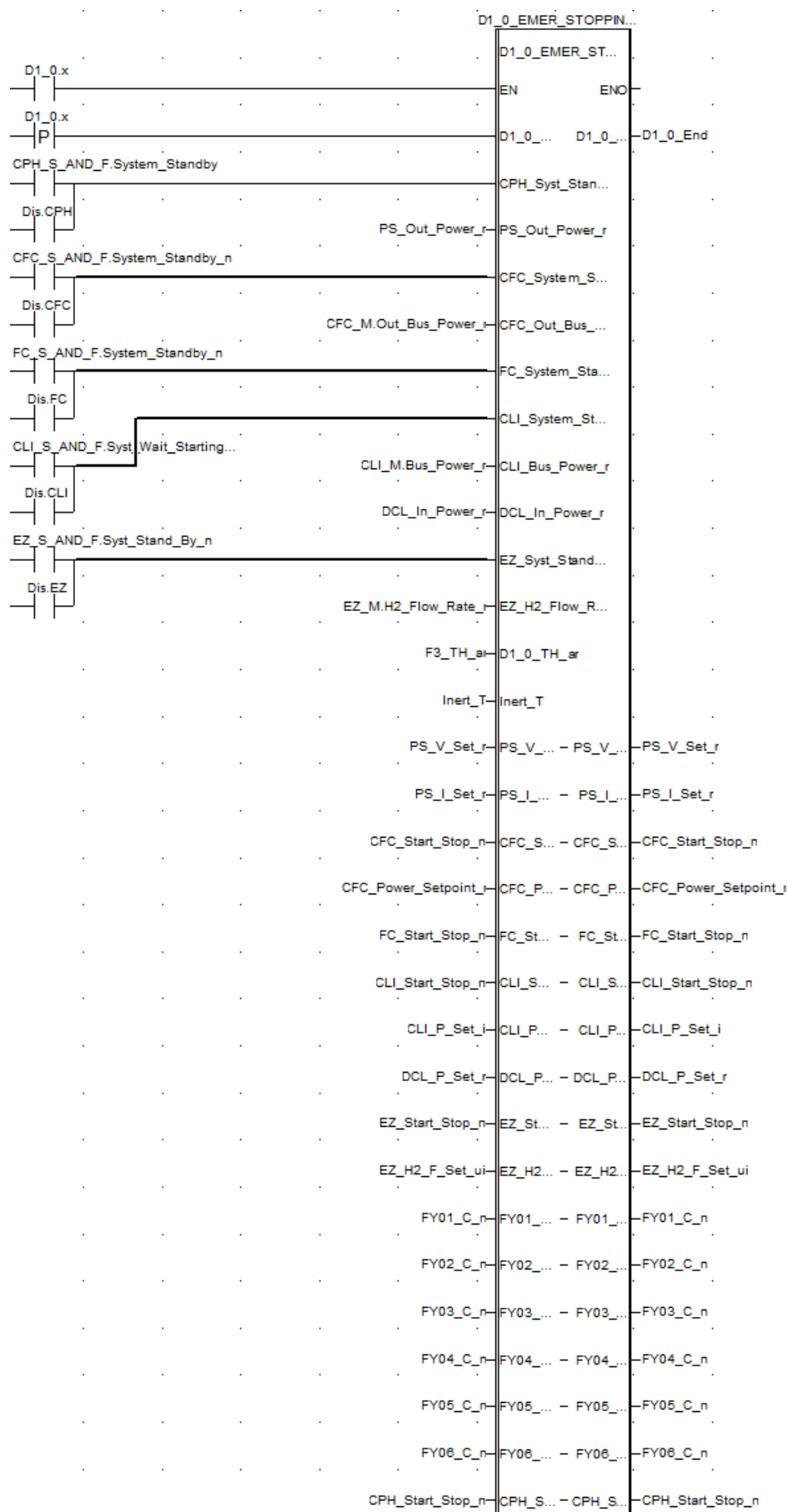


Figura 86. Interfaz del bloque de programa para el modo de operación *D1.0 Emergency Stop Sequence*.

4.7.7 Bloque para el estado de emergencia *D1.1 Emergency State*

El bloque de programa *DI_1_EMERGENCY_STATE*, cuya interfaz se muestra en la Figura 87, implementa las funcionalidades del estado de emergencia de la Microrred. Su ejecución es habilitada cuando se activa la etapa *DI_1* del código SFC contenido en la sección OMM (*Operation Modes Management*).

Este bloque inhibe todas las acciones de control de la planta, realizando un reset sobre todo el mapa de variables para su comando desde el FLC. Es decir, se ponen a cero las consignas de potencia para todos los equipos, así como sus señales de comando para enviarles órdenes de parada, y se cierran las electroválvulas de los circuitos de agua y de hidrógeno. Esta inhibición se realiza de manera permanente, siempre que este modo de operación esté activo.

Las entradas y salidas del bloque *DI_1_EMERGENCY_STATE* están directamente asociadas a los Mapas de Monitorización y de Comando General de la Microrred desde el FLC.

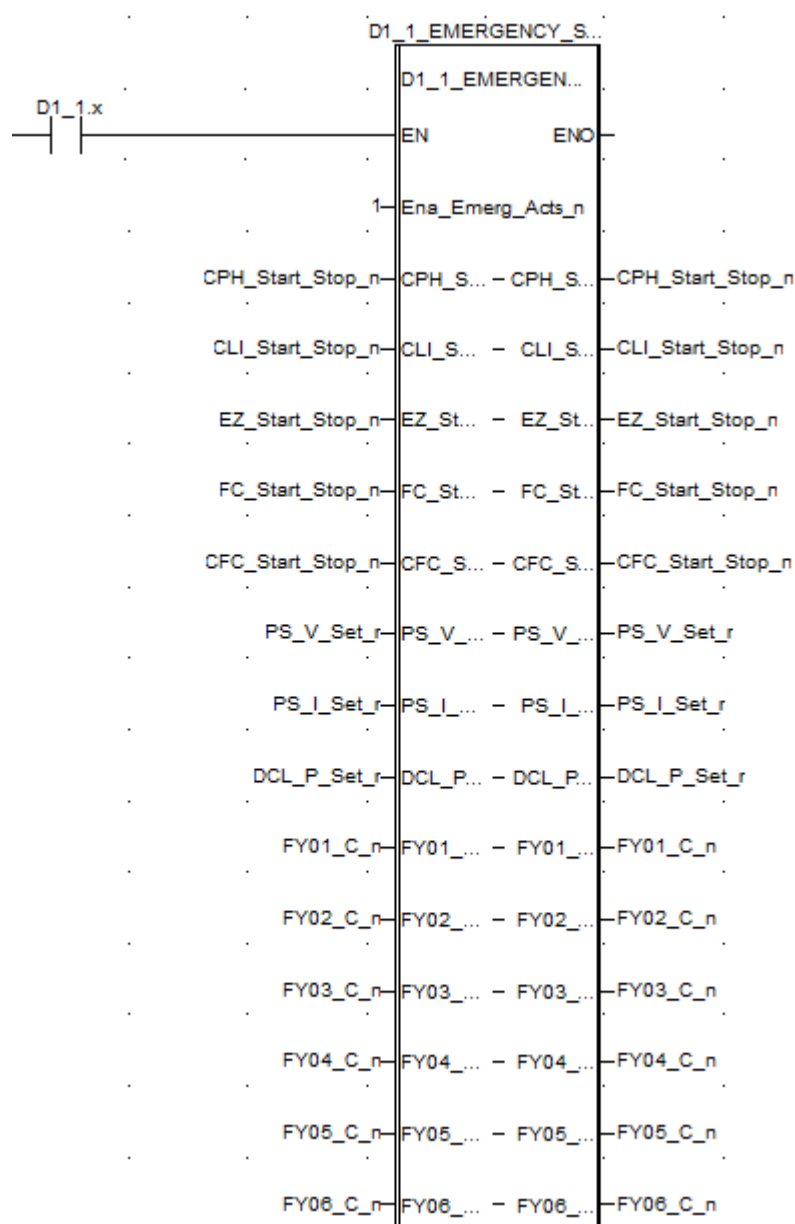


Figura 87. Interfaz del bloque de programa para el modo de operación *D1.1 Emergency State*.

5 GESTIÓN ENERGÉTICA DE LA MICRORRED DESDE EL SEGUNDO NIVEL DE CONTROL

5.1 Introducción. Justificación de la estrategia de control seleccionada.

Como última etapa del presente proyecto, y con el objetivo de testear y verificar que la gestión de la Microrred desde el Segundo Nivel de Control se realiza correctamente en el Modo de Funcionamiento Remoto, se ha diseñado e implementado en Matlab-Simulink un algoritmo de control heurístico basado en reglas para la gestión energética de la Microrred, y se ha probado de forma experimental ejecutándolo en la *workstation* que implementa el *Second Level Controller*.

En un principio, se planteó la posibilidad de utilizar una estrategia de control basada en modelos predictivos, dado que este tipo de estrategias son las que ofrecen mejores resultados en términos de gestión óptima y eficiente de microrredes, como lo demuestra la ingente cantidad de artículos académicos y bibliografía publicados al respecto. Sin embargo, debido al escaso tiempo de desarrollo disponible y a que el objetivo principal era comprobar que la Microrred podía ser controlada correctamente en el Modo de Funcionamiento Remoto desde el *Second Level Controller*, finalmente se optó por implementar una estrategia de control heurística basada en reglas, mucho más sencilla de formular y desarrollar aunque ofrezca una gestión menos eficiente.

5.2 Formulación del algoritmo de control heurístico basado en reglas.

Antes de formular la estrategia de control, es necesario definir y establecer cuál va a ser la configuración de la Microrred con la que se va a trabajar, especificando cuáles son los recursos de generación renovable y las unidades de almacenamiento de los que dispondrá, y si estará aislada o conectada a la red externa.

La Microrred dispondrá de una única fuente de energía renovable o RES (*Renewable Energy Source*), que para las pruebas que se van a realizar será un campo de paneles fotovoltaicos emulado mediante la fuente de alimentación programable con un perfil de generación para día soleado programado en Matlab-Simulink. La potencia generada por este campo fotovoltaico emulado no es controlable, y será tratada como una perturbación. Se ha decidido emplear un campo fotovoltaico emulado en lugar del campo fotovoltaico real de la Microrred para poder realizar el ensayo experimental en dos horas.

Por otro lado, la Microrred dispondrá de dos unidades de almacenamiento. La primera de ellas estará integrada por el stack de baterías de litio y su convertidor DC/DC asociado. La segunda estará integrada por el electrolizador, la pila de hidrógeno, su convertidor DC/DC asociado, los tanques de hidruros metálicos, el circuito de hidrógeno, y el circuito de agua para la calefacción y la refrigeración de los tanques de hidruros durante los procesos de absorción y desorción de hidrógeno. El stack de baterías de plomo ácido será utilizado como un elemento pasivo para absorber los transitorios que pueden producirse en el balance de potencias del bus principal de la Microrred ante cambios en la generación o en la demanda.

Se tendrá una única fuente de demanda en la Microrred, que será emulada mediante la carga electrónica programable con un perfil de demanda programado en Matlab-Simulink.

La Microrred operará en modo *grid-connected*, pudiendo vender a la red externa el exceso de potencia fotovoltaica generada, o comprar potencia para cubrir la demanda. La venta de energía a la red externa será emulada mediante la carga electrónica programable, y la compra de energía mediante la fuente de alimentación programable. Para las pruebas que se van a realizar, no será necesario incluir servicios de red, como pueden ser el control de la frecuencia o de la tensión de red mediante la inyección de potencia activa y reactiva respectivamente, o *low voltage ride through* por ejemplo.

Los objetivos de control que se han considerado para la formulación de la estrategia de control heurístico basada en reglas son los siguientes:

- **Regulación del balance de potencias en el bus principal de la Microrred.** Dicho balance será igual a la suma de la potencia fotovoltaica generada (P_{PV}) más la potencia comprada ($P_{G.PUR}$) más la potencia aportada o absorbida por los sistemas de almacenamiento (P_{LI} y P_{H2}), menos la demanda (D) y la potencia vendida ($P_{G.SELL}$).

$$P_{PV} + P_{G.PUR} + P_{LI} + P_{H2} - D - P_{G.SELL} = 0$$

Ecuación 5-1. Balance de potencias en el bus principal de la Microrred.

P_{LI} representa a la potencia absorbida o aportada por el convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio. P_{H2} representa tanto a la potencia absorbida por el electrolizador para la producción de hidrógeno como a la potencia aportada por el convertidor DC/DC asociado a la pila de hidrógeno a partir de la conversión del hidrógeno en electricidad. Cuando estas potencias son absorbidas del bus principal de la Microrred, su signo es negativo, y cuando son inyectadas su signo es positivo.

El balance de potencias en el bus principal de la Microrred debe ser siempre cero. Para ello, el algoritmo de control actuará sobre P_{LI} , P_{H2} , $P_{G.SELL}$ y $P_{G.PUR}$.

En caso de que la potencia fotovoltaica sea superior a la demanda, primero se almacenará el exceso de energía en el stack de baterías de litio. Si el stack de baterías de litio está completamente cargado, entonces la energía será almacenada en forma de hidrógeno en los tanques de hidruros. Cuando los tanques de hidruros estén llenos, entonces el exceso de potencia será vendido a la red externa.

En caso de que la potencia fotovoltaica sea inferior a la demanda, el algoritmo de control podrá cubrir el exceso de demanda mediante la energía almacenada en el stack de baterías de litio, en los tanques

de hidruros, o comprando la energía a la red externa.

Obviamente, para el algoritmo de control que aquí se está formulando, tanto la potencia fotovoltaica como la demanda son perturbaciones.

- **Gestión óptima de la Microrred teniendo en cuenta los costes de mantenimiento, la durabilidad y las restricciones de operación de los equipos, así como la tarifa eléctrica de la red externa.**

Las variables de actuación que se han establecido para el algoritmo de control tendrán las siguientes restricciones:

- **Potencia aportada o absorbida por el stack de baterías de litio (P_{LI}).** Cuando se encienda el convertidor asociado al stack de baterías de litio, esta potencia tendrá que estar en el rango de 100W hasta 3kW, en el caso de que se esté aportando potencia al bus principal, y en el rango de -100W hasta -3kW en caso de que se esté absorbiendo potencia.
- **Potencia aportada o absorbida por el sistema de almacenamiento basado en hidrógeno (P_{H2}).** Cuando se encienda el convertidor asociado a la pila de hidrógeno, esta potencia tendrá que estar en el rango de 50W hasta 1000W, y tendrá que variar con rampas de subida de 100W/s como máximo para minimizar la degradación de la pila. Cuando se encienda el electrolizador, esta potencia tendrá que estar en el rango de 600 W hasta 2900 W.
- Potencia vendida a la red externa ($P_{G.SELL}$). Tendrá que estar comprendida en el rango de 0 a 1000W.
- Potencia comprada a la red externa ($P_{G.PUR}$). Tendrá que estar comprendida en el rango de 0 a 1000W.

El estado de carga del stack de baterías de litio (SOC_{LI}) tendrá que estar comprendido entre el 45% y el 95%. Por su parte, el nivel de llenado de los tanques de hidruros metálicos (SOC_{H2}) habrá de estar comprendido entre el 10% y el 95%.

Es necesario imponer también restricciones al estado de carga del stack de baterías de plomo-ácido (SOC_{PB}), con el fin de disponer siempre de reserva suficiente para absorber los regímenes transitorios del bus principal minimizando en lo posible su degradación. Tendrá un SOC mínimo del 50%, y un SOC máximo del 80%.

El coste de mantenimiento del stack de baterías de litio (OM_{LI}) se ha modelado mediante una ecuación que calcula el coste del kWh aportado por el stack de baterías de litio en función de su estado de carga. Esta ecuación ha sido obtenida a partir de la curva de degradación para baterías de litio ferrofosfato que se muestra en la Figura 88, que ha sido extraída de [46], teniendo en cuenta un precio futurista para las baterías de litio de 100 € por kWh.

$$OM_{LI}[\text{€/kWh}] = 1.4545 \cdot SOC_{LI}^2 - 3.2795 \cdot SOC_{LI} + 1.8209$$

Ecuación 5-2. Ecuación para el cálculo del coste de mantenimiento del stack de baterías de litio en función de su estado de carga.

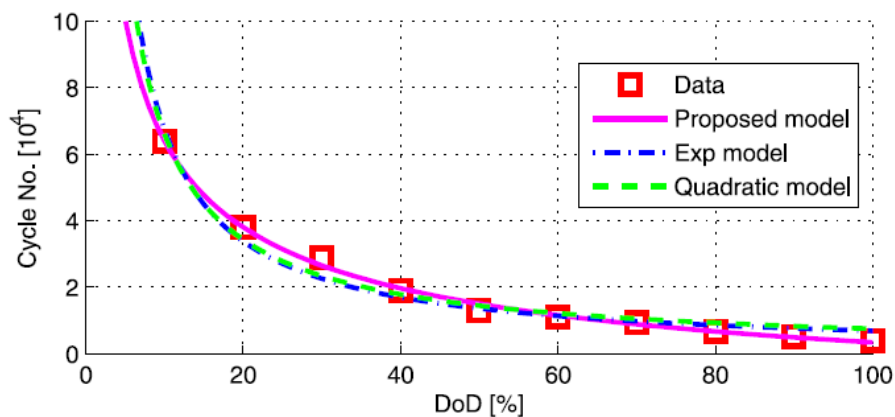


Figura 88. Curva de degradación para baterías de litio ferrofosfato. Extraída de [46].

Para el coste de mantenimiento de la pila de hidrógeno (OM_{H_2}), se han empleado los mismos modelos matemáticos que utilizó Luis Valverde en su Tesis Doctoral [1], basados en el modelo de degradación de Zakrisson [47].

$$\text{If Fuel Cell On} \rightarrow OM_{H_2}[\text{€/KwH}] = 0.12 \cdot \frac{(1 + P_{H_2})}{P_{H_2.M\acute{A}X}}$$

$$\text{If Fuel Cell Off} \rightarrow OM_{H_2}[\text{€/KwH}] = 0.24$$

Ecuación 5-3. Ecuación para el cálculo del coste de mantenimiento de la pila de hidrogeno basada en el modelo de degradación de Zakrisson.

Respecto a la tarifa eléctrica para la compra de energía eléctrica a la red, se ha empleado el perfil de discriminación horaria que se muestra en la Figura x.

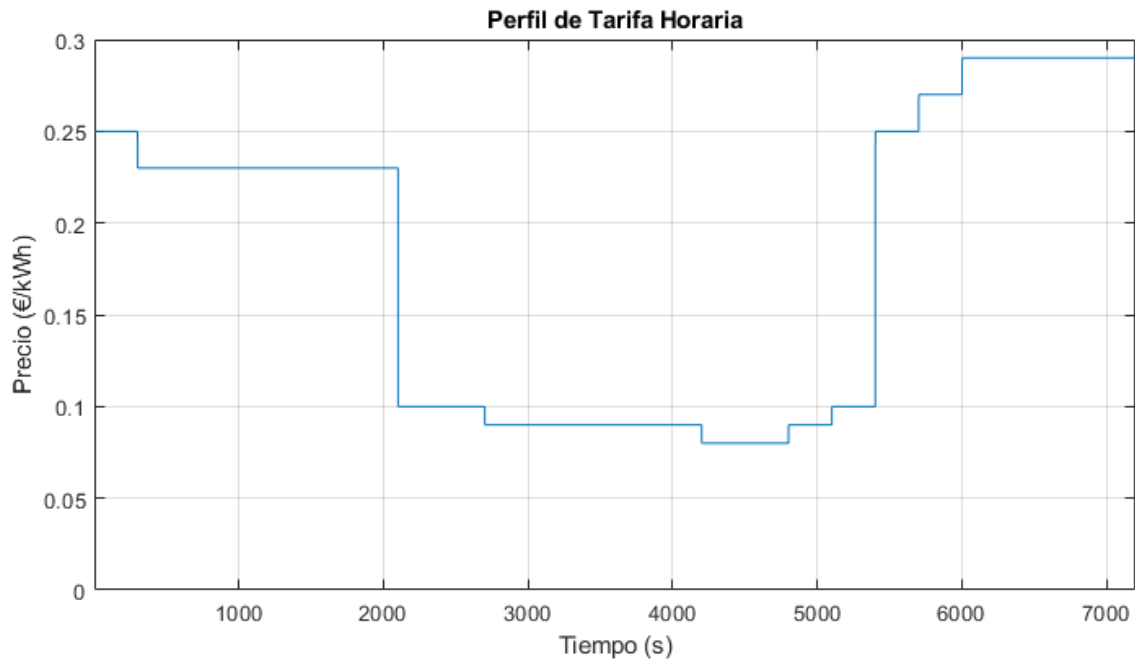


Figura 89. Perfil de tarifa horaria para la compra de energía a la red externa.

- **Regulación del estado de carga del stack de baterías de plomo ácido.** Para poder mantener el SOC del stack de baterías de plomo-ácido entre los límites que se han definido, es necesario que el algoritmo de control le inyecte potencia o se la extraiga. Para ello, se ha añadido al algoritmo un control por histéresis en función del SOC del stack de baterías de plomo-ácido que adiciona o resta 100 W al balance de potencias del bus principal.

Una vez establecidos y descritos en su totalidad los objetivos de control a considerar, para la formulación de la estrategia de control se han analizado todas las combinaciones posibles respecto a la disponibilidad de las unidades de almacenamiento en cuanto a su estado de carga, sus costes de utilización y si pueden o no absorber o aportar potencia dependiendo de sus restricciones, incluyendo además la compra o la venta de energía a la red externa según la tarifa horaria establecida, tanto en el caso en que la demanda es mayor que la potencia fotovoltaica generada como en el caso contrario. Teniendo en cuenta la configuración que se ha escogido para la Microrred, que era una única RES, dos unidades de almacenamiento, una única demanda y conexión a la red externa para vender o comprar energía, la cantidad de casos que se obtienen, que es 34, es relativamente moderada, fácil de tratar mediante un algoritmo heurístico basado en reglas. Sin embargo, si se añadieran una RES o una unidad de almacenamiento extra, esta cantidad se duplicaría. Si se considerase la

inclusión de los servicios de red, que es un requisito exigido en la práctica para cualquier microrred que inyecte potencia a la red general, por cada servicio de red implementado la cantidad de casos podría triplicarse, o incluso cuadruplicarse. Entonces resultaría inviable aplicar el tipo de estrategia de control que aquí se propone, y habría que recurrir a otras estrategias de control con una jerarquía más completa, y que estarían basadas en modelos de control predictivo, control estocástico o en la teoría de juegos, por ejemplo.

El código que se ha desarrollado para la implementación del algoritmo de control se encuentra en el Anexo V. Los diferentes casos que se han obtenido y se consideran se encuentran descritos en los comentarios del código.

5.3 Simulación del algoritmo de control heurístico basado en reglas.

Antes de realizar el ensayo experimental con la Microrred, se han efectuado simulaciones en Matlab-Simulink para verificar que el algoritmo de control que se ha diseñado trabaja correctamente, y que el *script* que lo implementa está libre de errores de programación.

Para simular los stacks de baterías de litio y de plomo ácido, y para el tanque de hidruros metálicos, se han empleado respectivamente los siguientes modelos en espacios de estado para tiempo.

$$\begin{aligned} X_{LI}(k+1) &= X_{LI}(k) + \eta_{LI} \cdot T_{sample} \cdot P_{LI}(k) \\ X_{PB}(k+1) &= X_{PB}(k) + \eta_{PB} \cdot T_{sample} \cdot P_{PB}(k) \\ X_{H2}(k+1) &= X_{H2}(k) + \eta_{H2} \cdot T_{sample} \cdot P_{H2}(k) \end{aligned}$$

Ecuación 5-4. Modelos en espacios de estados discreto para la simulación de los stacks de baterías de litio y de plomo ácido y del tanque de hidruros metálicos.

donde:

- X_{LI} es el nivel de energía del stack de baterías de litio en kWh.
- η_{LI} es la eficiencia de la carga y la descarga del stack de baterías de litio. Su valor es de 0.9.
- P_{LI} es la potencia aportada o absorbida por el stack de baterías de litio en kW.
- X_{PB} es el nivel de energía del stack de baterías de plomo-ácido en kWh.
- η_{PB} es la eficiencia de la carga y la descarga del stack de baterías de plomo. Su valor es de 0.9.
- P_{PB} es la potencia aportada o absorbida por el stack de baterías de plomo-ácido en kW.
- X_{H2} es el nivel de energía en kWh equivalente a la cantidad de hidrógeno almacenada en los tanques de hidruros metálicos.
- η_{H2} es la eficiencia de la carga y la descarga de la energía contenida en los tanques de hidruros metálicos en forma de vector hidrógeno. Su valor es de 0.22.
- P_{H2} es la potencia aportada por la pila de combustible o absorbida por el electrolizador.
- T_{sample} es el tiempo de muestreo para las simulaciones, que es de 1 segundo.

Para simular la generación fotovoltaica y la demanda, se han empleado respectivamente los perfiles que se muestran en la Figura 90 y en la Figura 91.

En la Figura 92, se muestra el montaje realizado en Simulink.

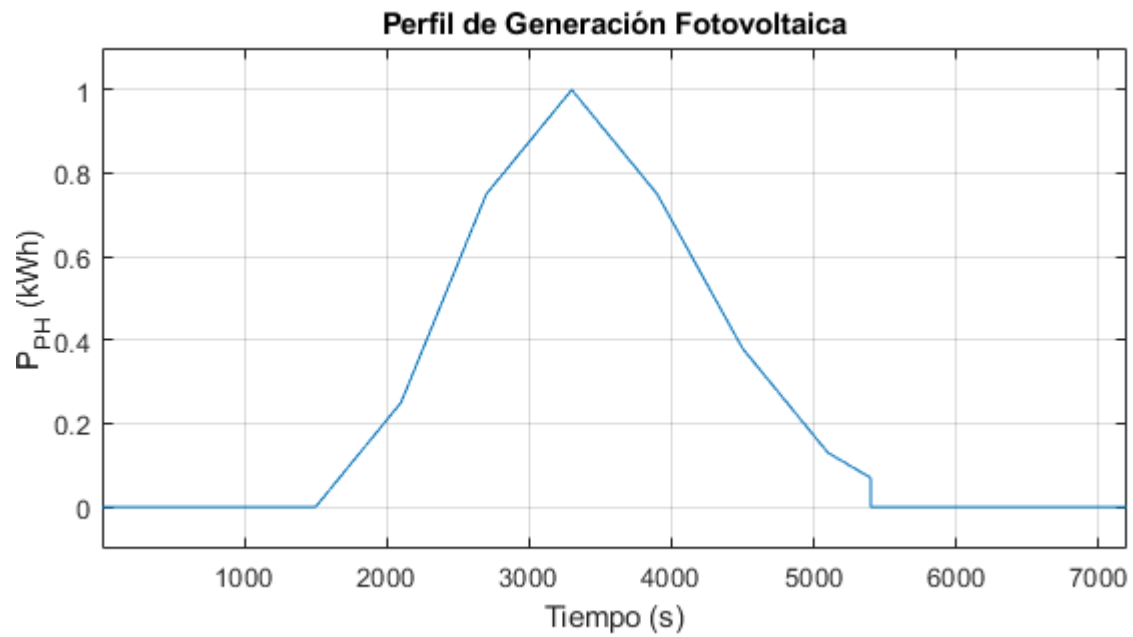


Figura 90. Perfil de generación fotovoltaica empleado en las simulaciones.

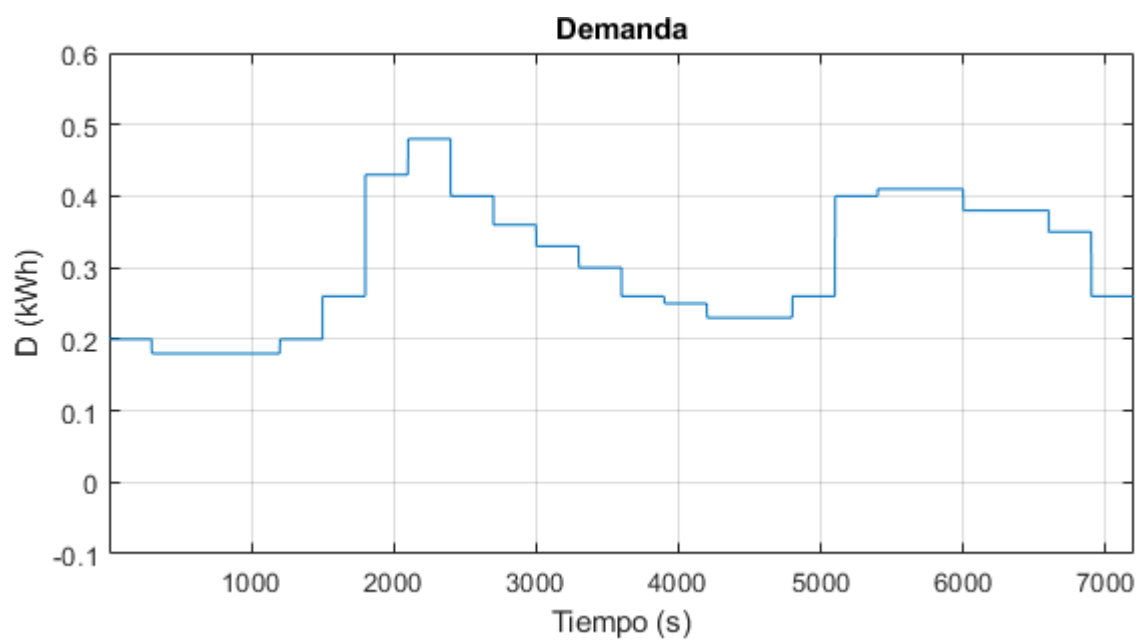


Figura 91. Perfil de demanda empleado en las simulaciones.

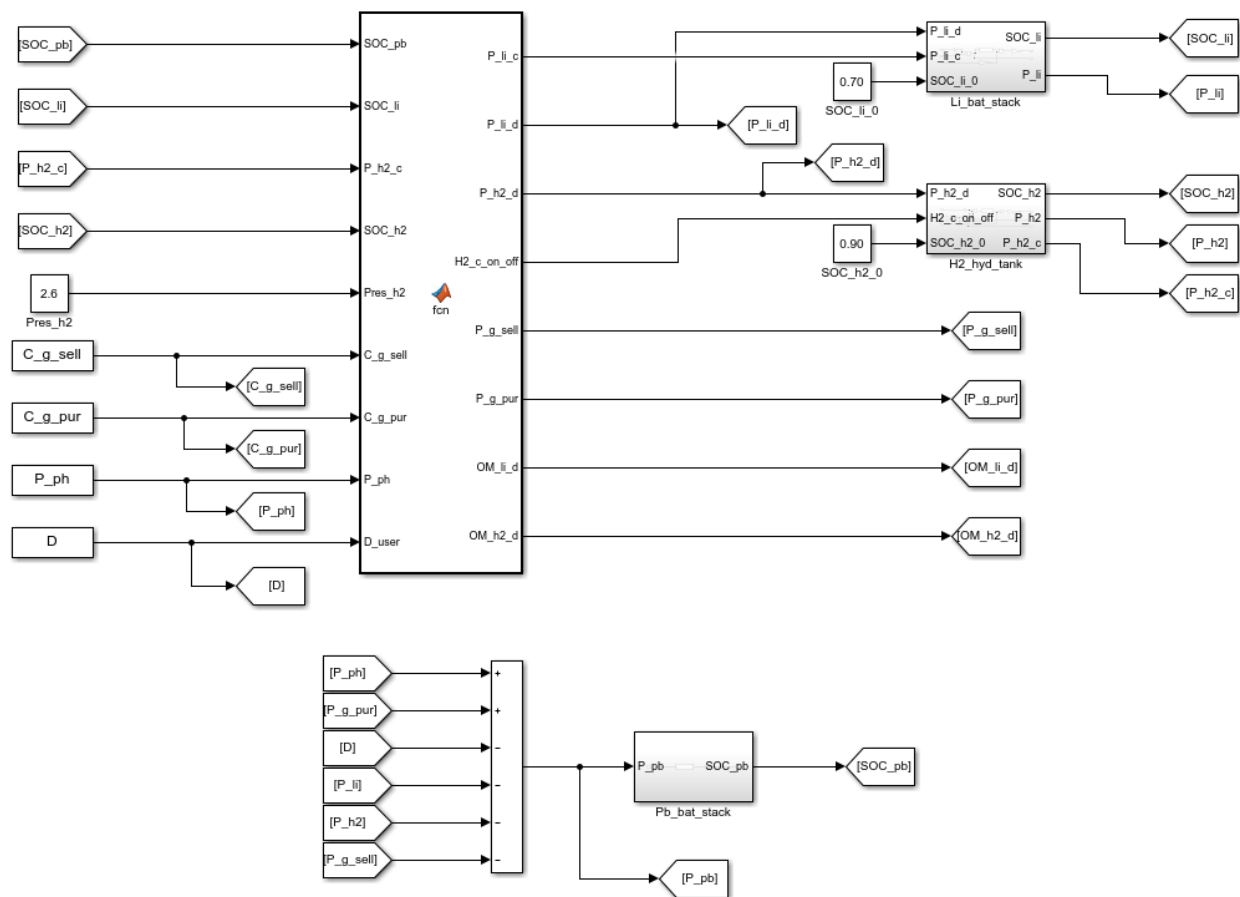


Figura 92. Montaje en Simulink para la simulación del algoritmo de control heurístico basado en reglas.

Se han realizado seis simulaciones distintas, para diferentes estados de carga en el stack de baterías de litio y en el tanque de hidruros metálicos.

En la primera simulación, el SOC inicial en el stack de baterías de litio era de un 35%, y en el tanque de hidruros metálicos de un 5%. En la Figura 93 se muestran las curvas de potencia obtenidas en la simulación, y en la Figura 94 las curvas de SOC.

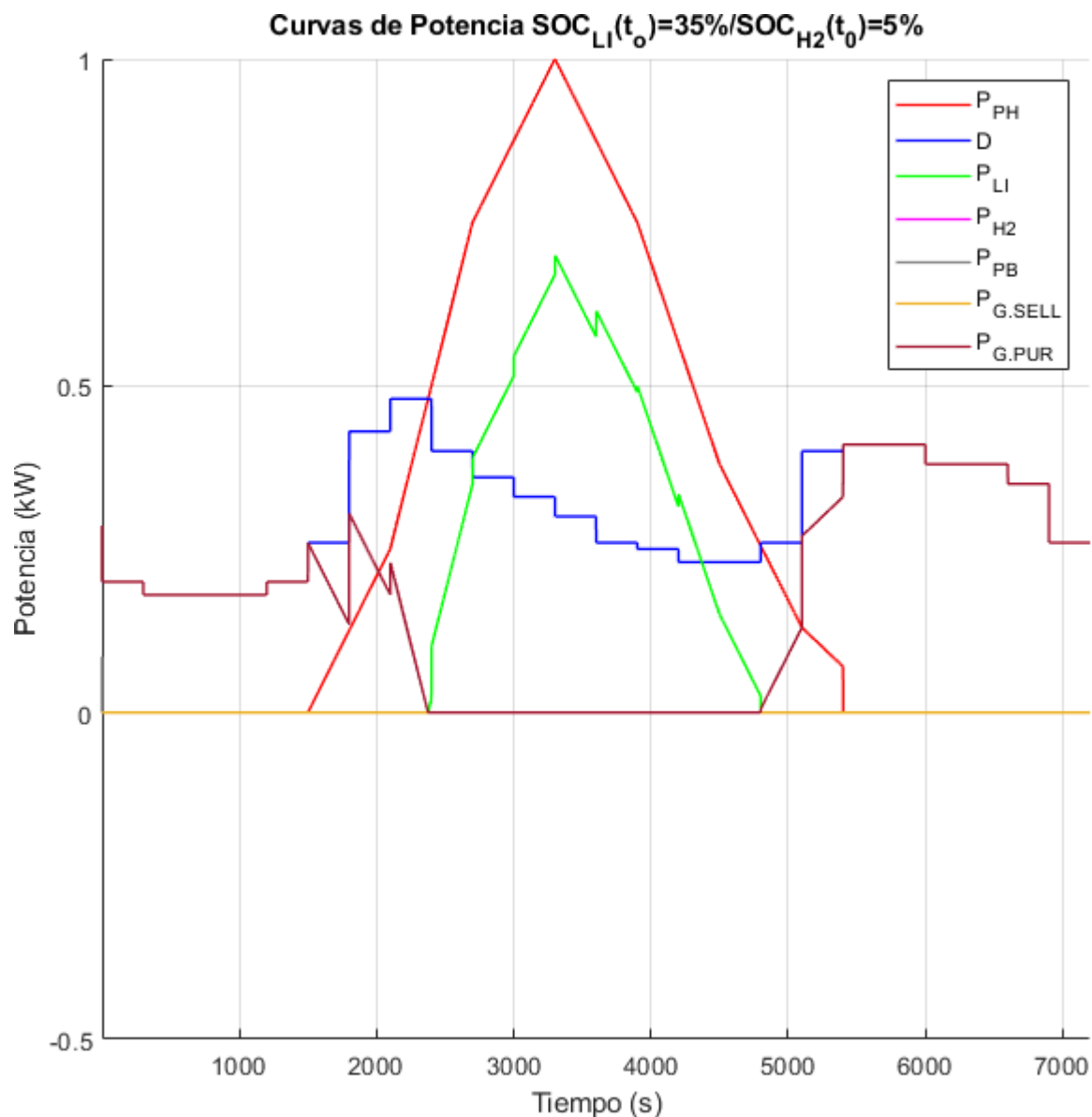


Figura 93. Curvas de potencia obtenidas con estado de carga inicial del 35% para el stack de baterías de litio y del 5% para los tanques de hidruros metálicos.

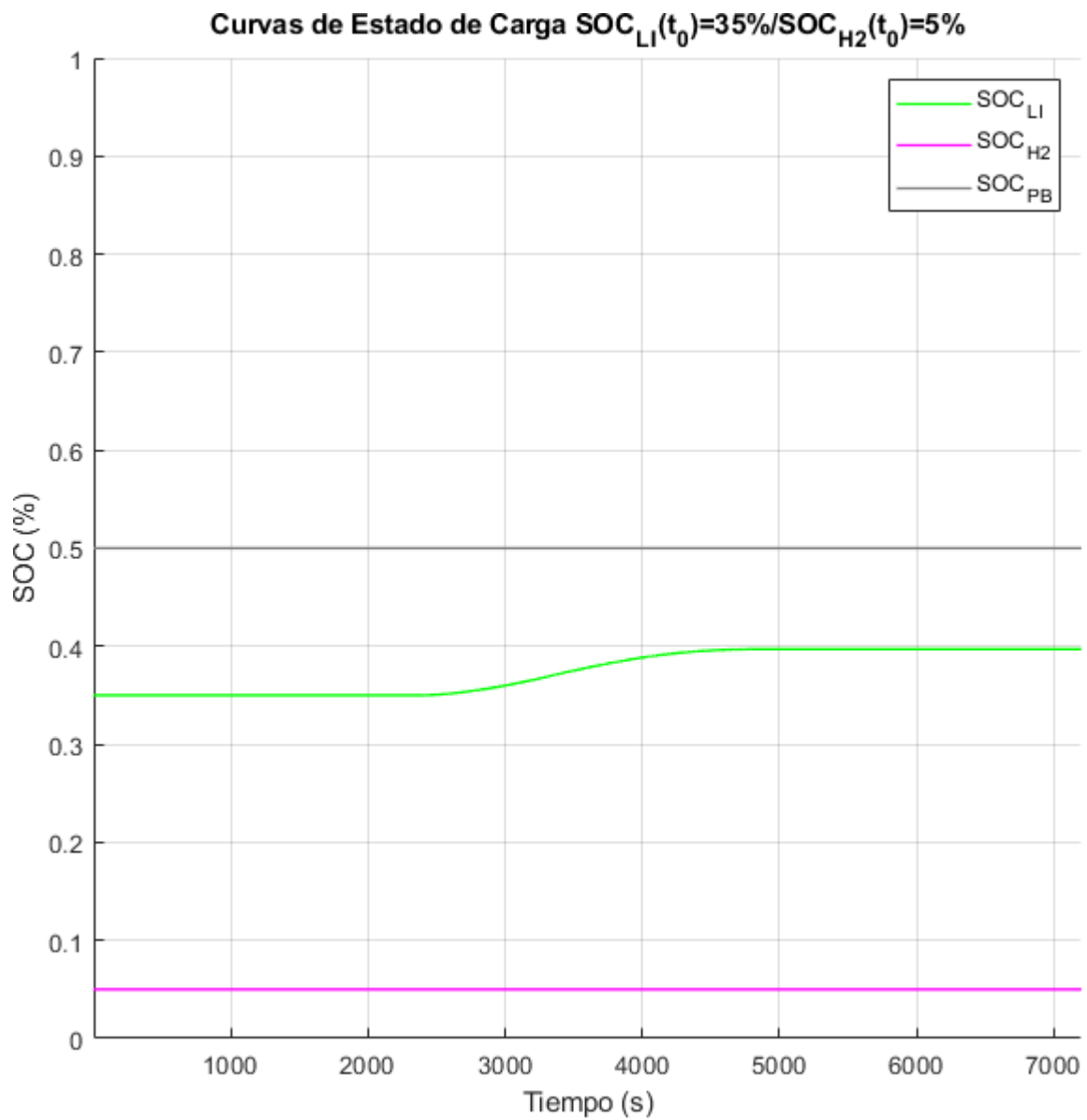


Figura 94. Curvas de SOC obtenidas con estado de carga inicial del 35% para el stack de baterías de litio y del 5% para los tanques de hidruros metálicos.

En la segunda simulación, el SOC inicial en el stack de baterías de litio era de un 50%, y en el tanque de hidruros metálicos de un 5%. En la Figura 95 se muestran las curvas de potencia obtenidas en la simulación, y en la Figura 96 las curvas de SOC.

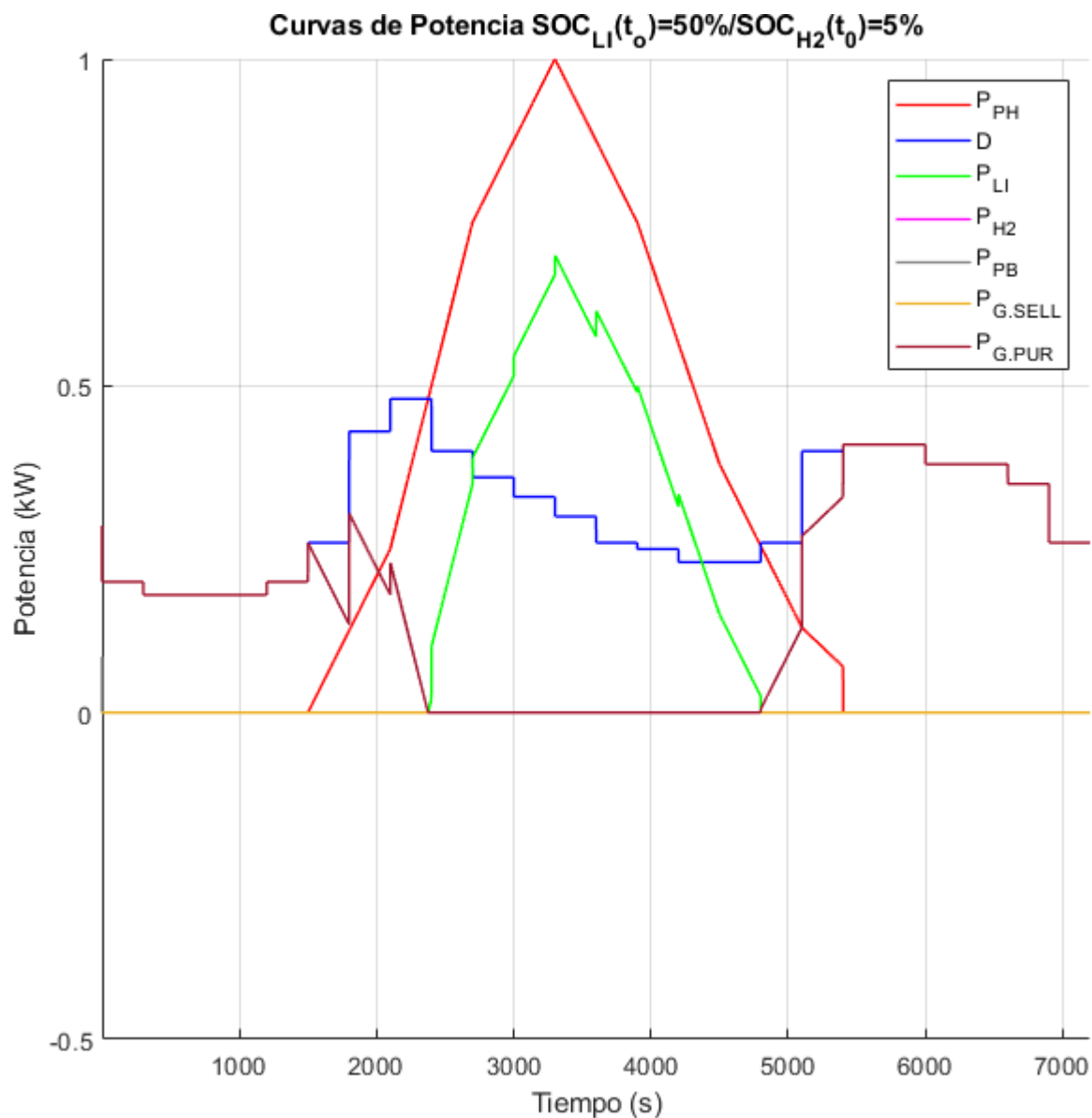


Figura 95. Curvas de potencia obtenidas con estado de carga inicial del 50% para el stack de baterías de litio y del 5% para los tanques de hidruros metálicos.

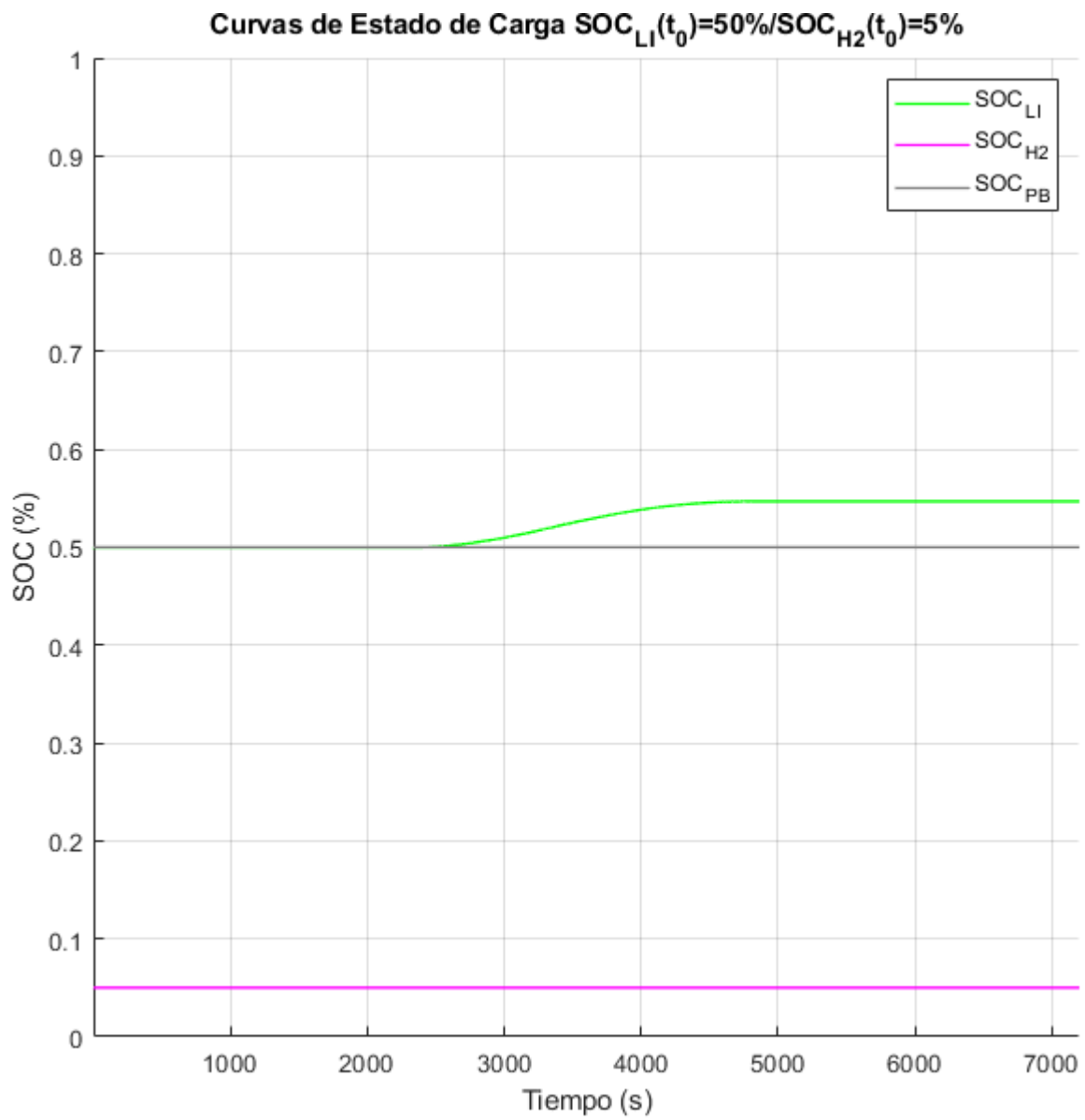


Figura 96. Curvas de SOC obtenidas con estado de carga inicial del 50% para el stack de baterías de litio y del 5% para los tanques de hidruros metálicos.

En la tercera simulación, el SOC inicial en el stack de baterías de litio era de un 50%, y en el tanque de hidruros metálicos de un 90%. En la Figura 97 se muestran las curvas de potencia obtenidas en la simulación, y en la Figura 98 las curvas de SOC.

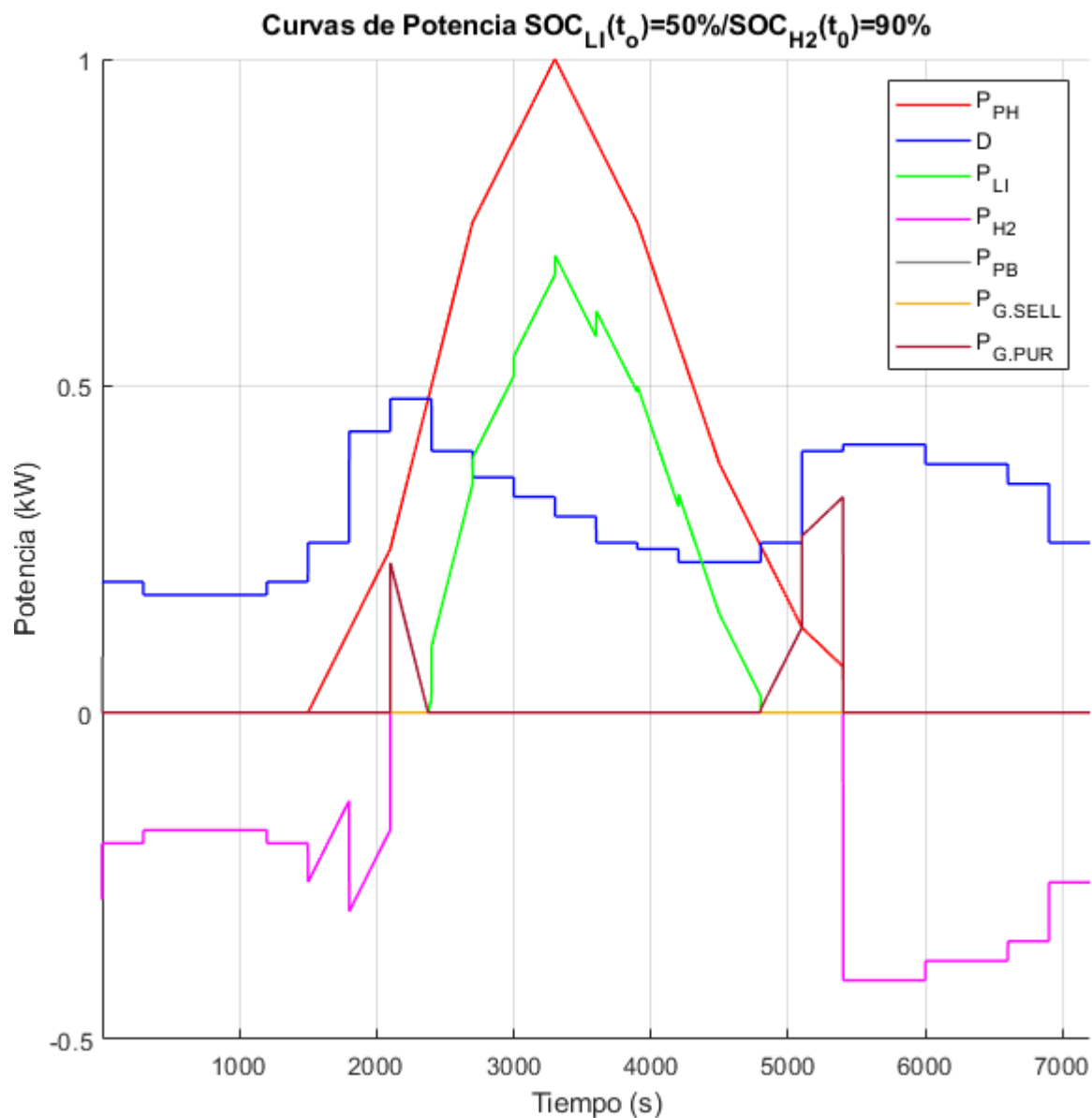


Figura 97. Curvas de potencia obtenidas con estado de carga inicial del 50% para el stack de baterías de litio y del 90% para los tanques de hidruros metálicos.

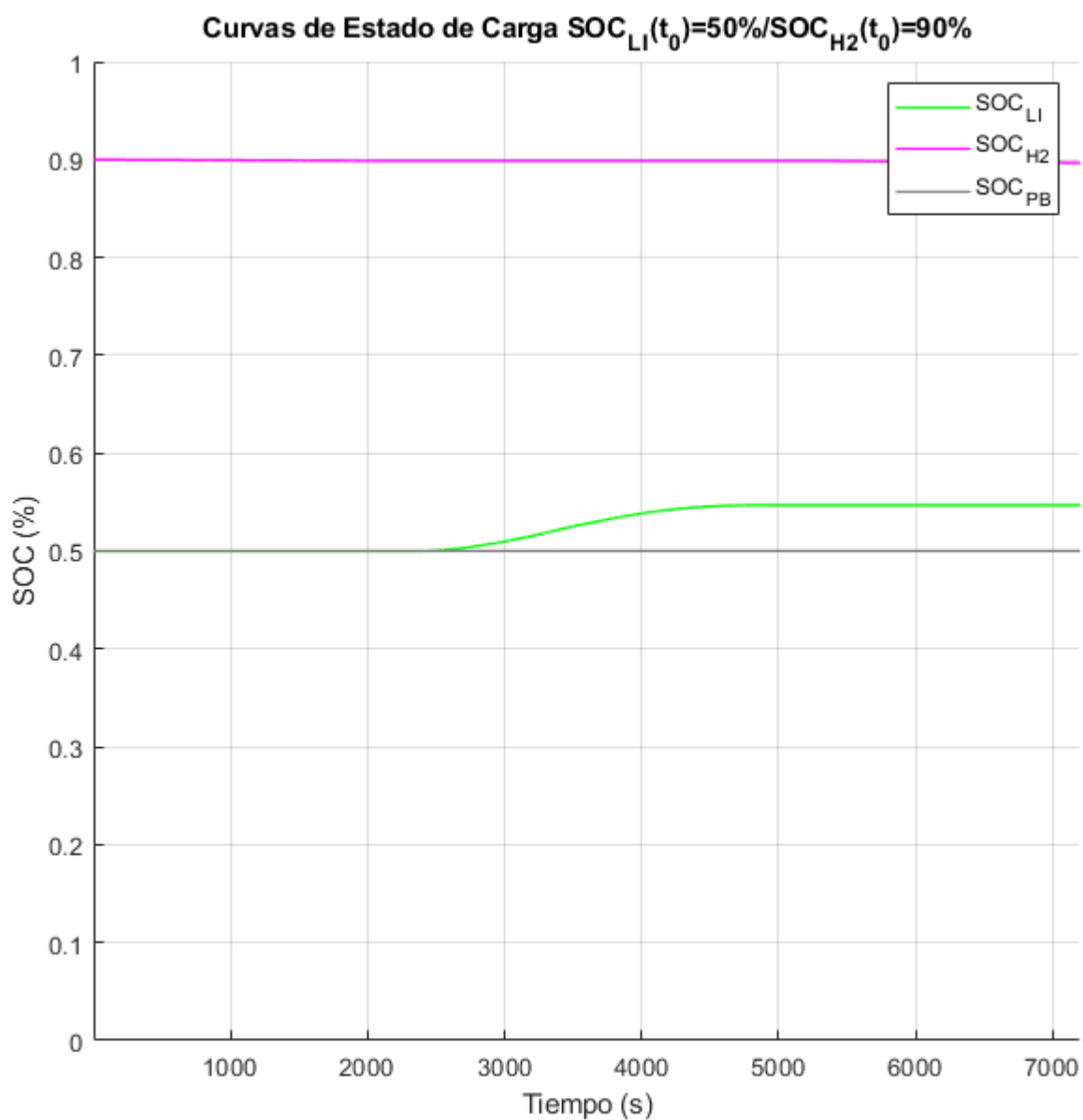


Figura 98. Curvas de SOC obtenidas con estado de carga inicial del 50% para el stack de baterías de litio y del 90% para los tanques de hidruros metálicos.

En la cuarta simulación, el SOC inicial en el stack de baterías de litio era de un 75%, y en el tanque de hidruros metálicos de un 5%. En la Figura 99 se muestran las curvas de potencia obtenidas en la simulación, y en la Figura 100 las curvas de SOC.

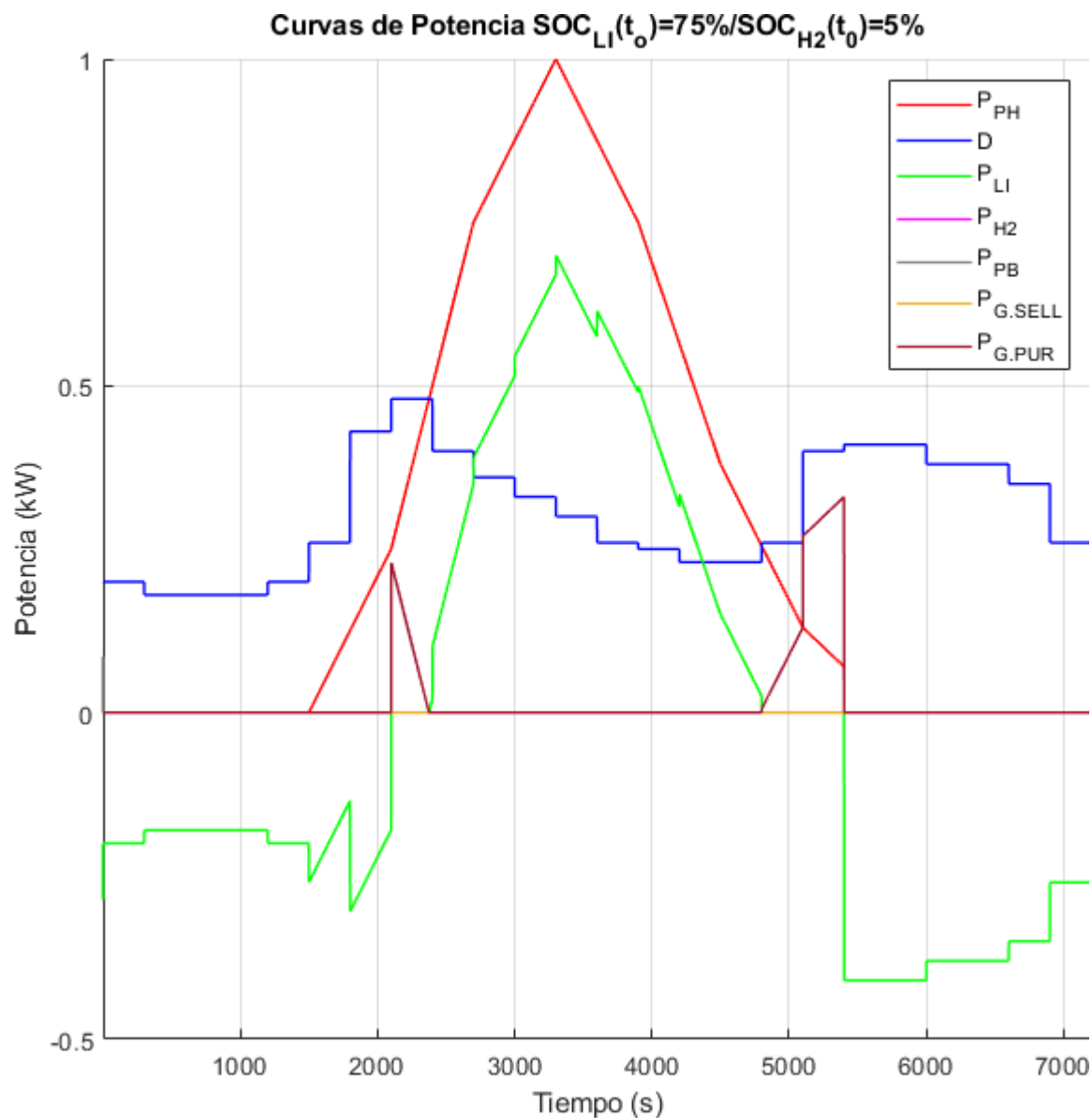


Figura 99. Curvas de potencia obtenidas con estado de carga inicial del 75% para el stack de baterías de litio y del 5% para los tanques de hidruros metálicos.

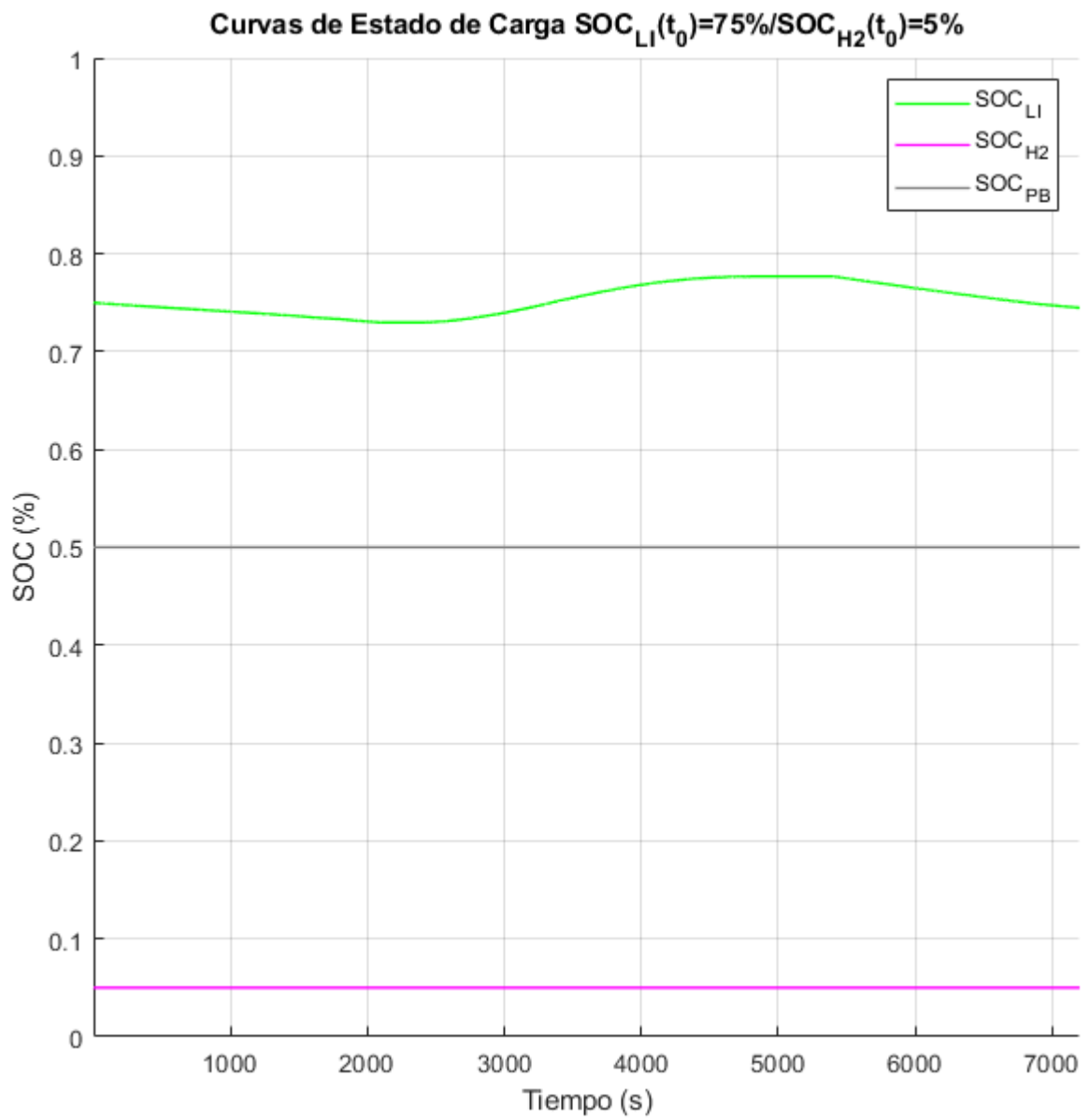


Figura 100. Curvas de SOC obtenidas con estado de carga inicial del 75% para el stack de baterías de litio y del 5% para los tanques de hidruros metálicos.

En la quinta simulación, el SOC inicial en el stack de baterías de litio era de un 75%, y en el tanque de hidruros metálicos de un 90%. En la Figura 101 se muestran las curvas de potencia obtenidas en la simulación, y en la Figura 102 las curvas de SOC.

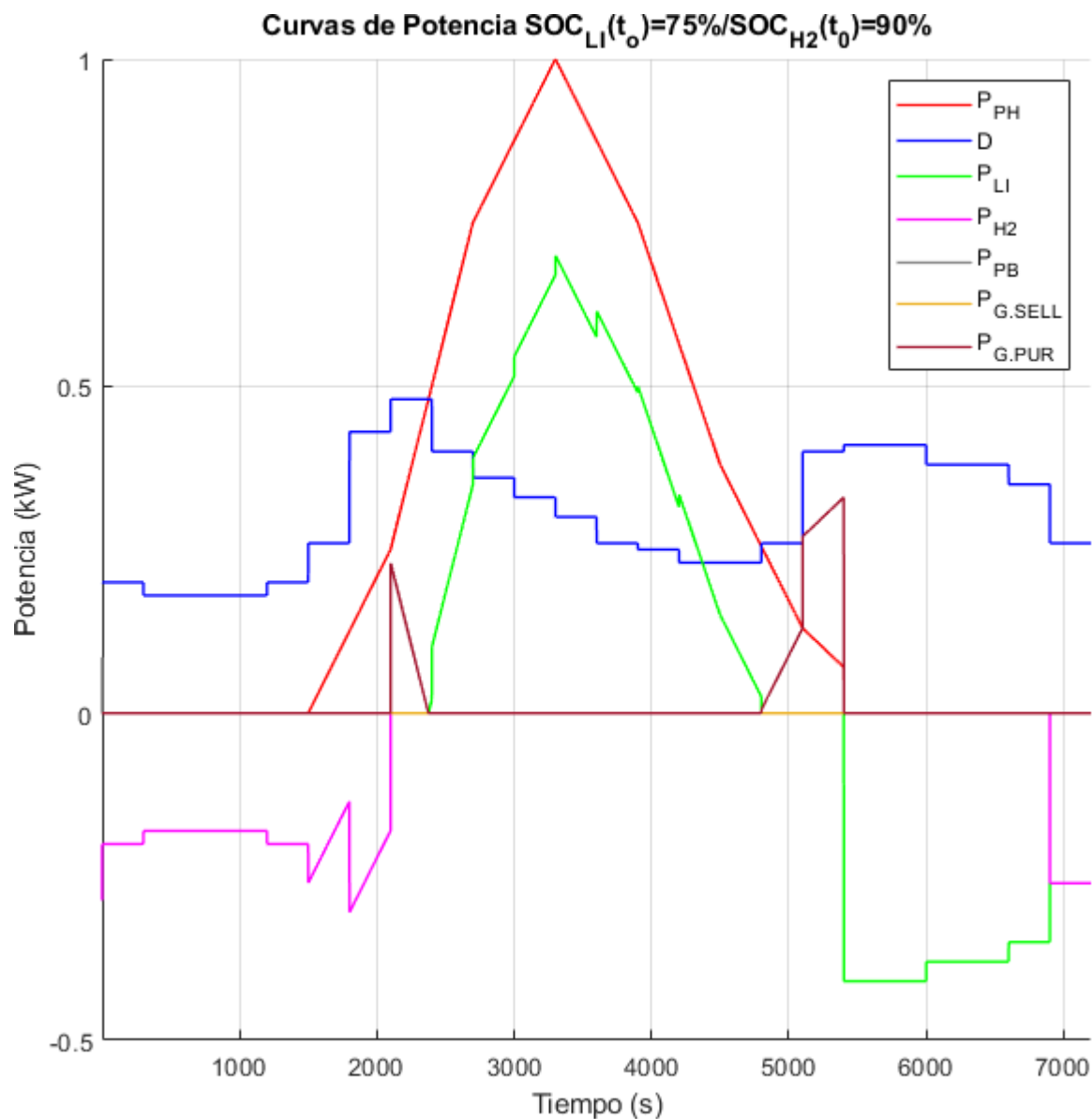


Figura 101. Curvas de potencia obtenidas con estado de carga inicial del 75% para el stack de baterías de litio y del 90% para los tanques de hidruros metálicos.

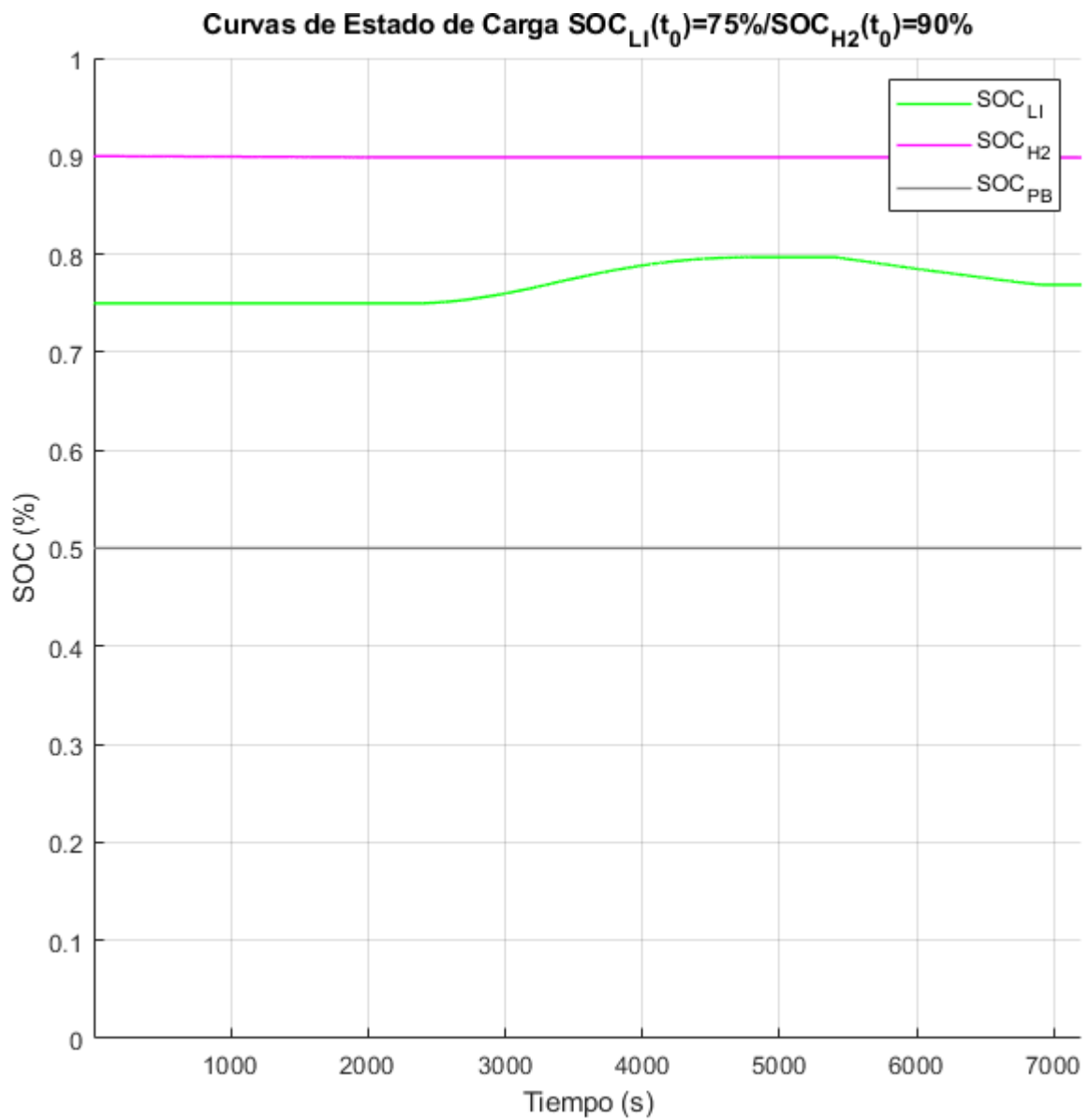


Figura 102. Curvas de SOC obtenidas con estado de carga inicial del 75% para el stack de baterías de litio y del 90% para los tanques de hidruros metálicos.

Por último, en la sexta simulación, el SOC inicial en el stack de baterías de litio era de un 85%, y en el tanque de hidruros metálicos de un 90%. En la Figura 103 se muestran las curvas de potencia obtenidas en la simulación, y en la Figura 104 las curvas de SOC.

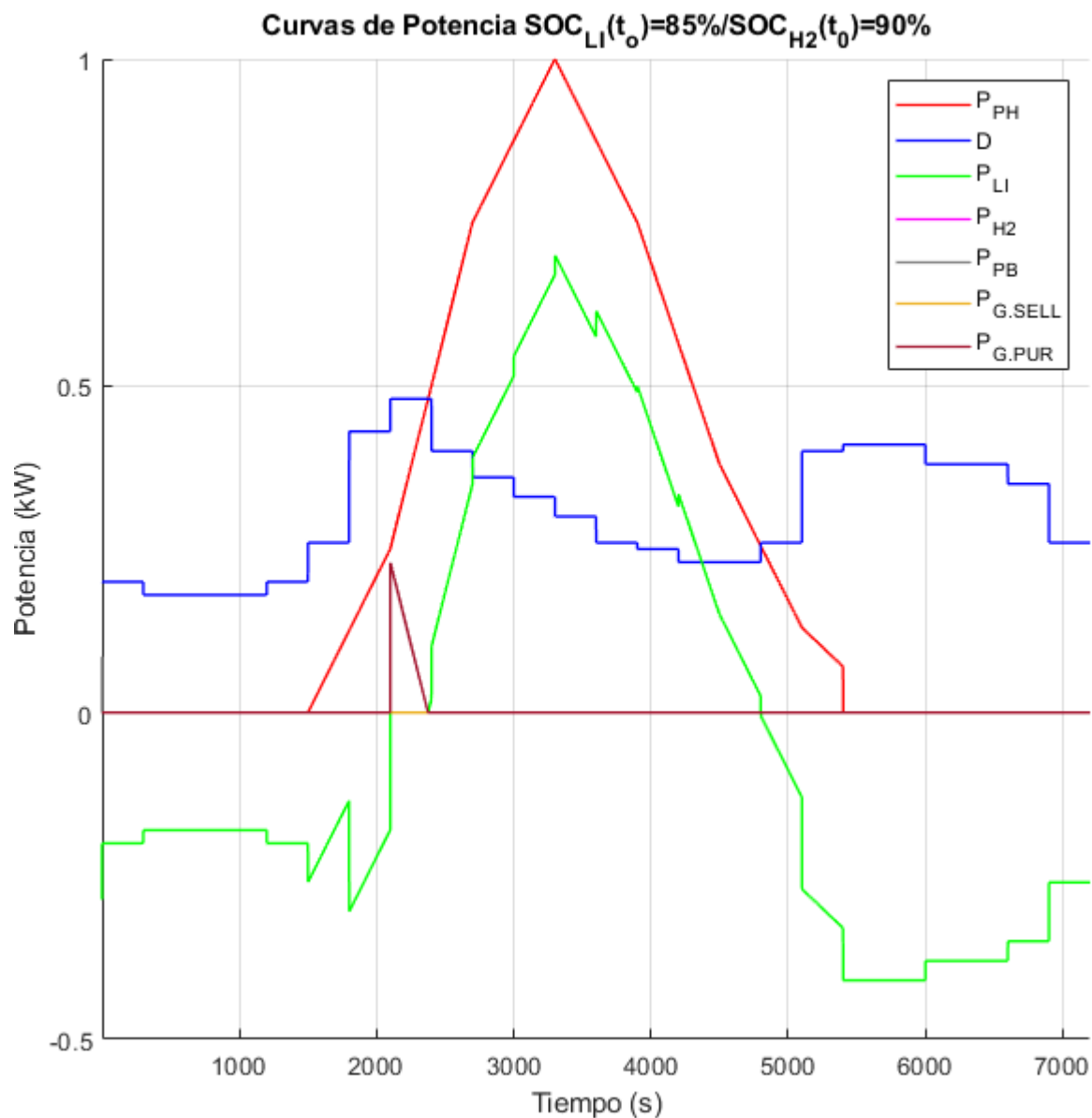


Figura 103. Curvas de potencia obtenidas con estado de carga inicial del 85% para el stack de baterías de litio y del 90% para los tanques de hidruros metálicos.

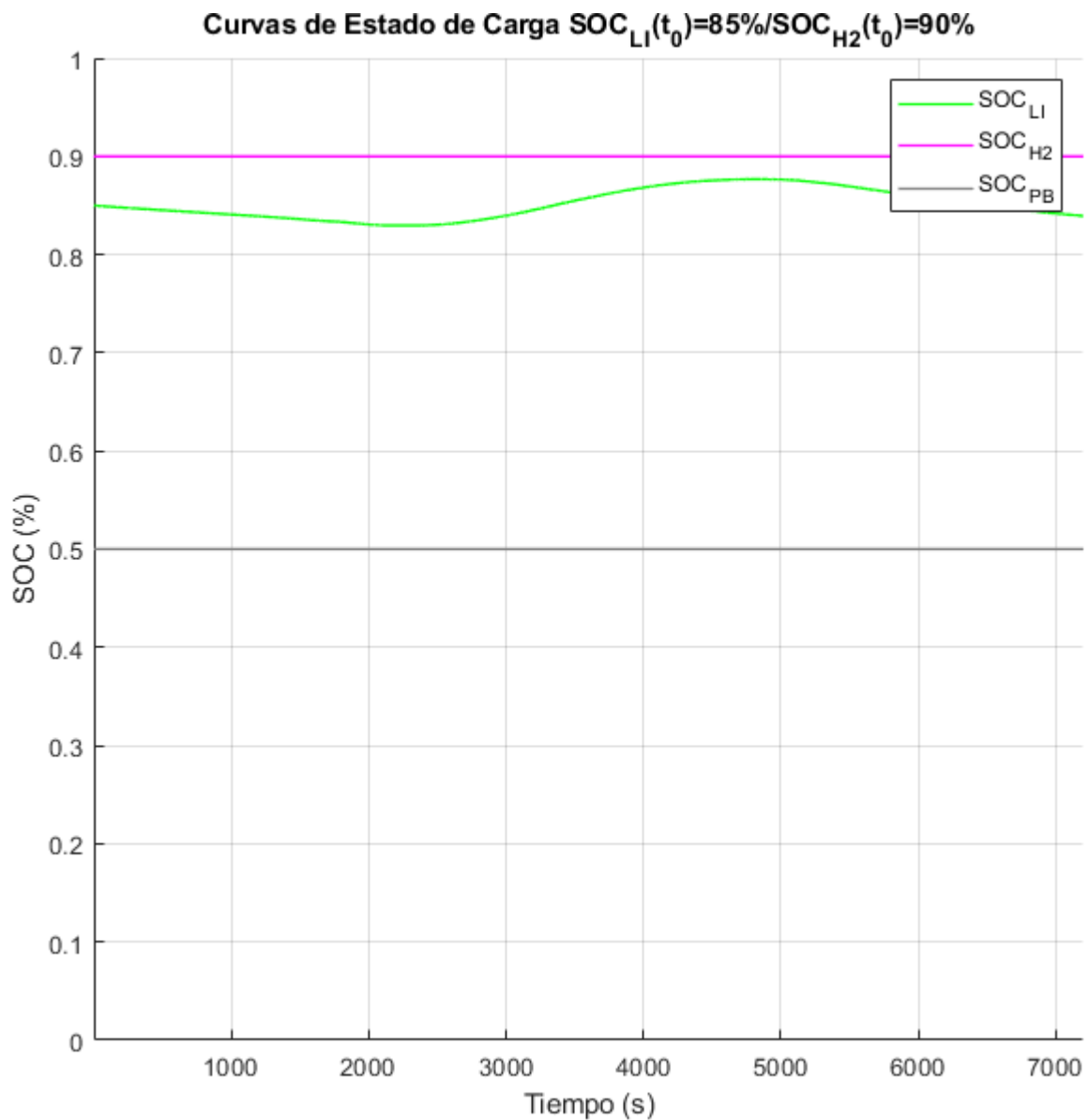


Figura 104. Curvas de SOC obtenidas con estado de carga inicial del 85% para el stack de baterías de litio y del 90% para los tanques de hidruros metálicos.

A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones, se concluyó que el algoritmo de control trabajaba correctamente, y se procedió a efectuar el ensayo experimental.

5.4 Realización del ensayo experimental con el algoritmo de control heurístico basado en reglas.

Una vez comprobado el correcto funcionamiento del algoritmo implementado a través de las simulaciones, se realizó un ensayo experimental con la Microrred. Se realizó un montaje en Matlab-Simulink que incluía bloques OPC Server para la comunicación con el *First Level Controller*, y se incluyó en él un bloque MATLAB Function con el *script* del algoritmo. Para emular la generación fotovoltaica y la demanda con la fuente de alimentación y la carga electrónica programables, se emplearon los mismo perfiles que se habían creado para las simulaciones. La medida del SOC de los tanques de hidruros metálicos fue sustituida por un valor constante del 95%, porque se decidió no emplear el electrolizador en el ensayo debido a que no se disponía de una medida de la potencia que consume, y de esta manera se evitaba su arranque.

El ensayo duró una hora y media. En la Figura 105 pueden verse las curvas de potencia obtenidas, y en la Figura 106 las curvas de SOC.

Observando los resultados del ensayo, puede concluirse que la gestión de la Microrred desde el Segundo Nivel de Control en el Modo de Funcionamiento Remoto, efectivamente, se realiza correctamente. El algoritmo trabaja bien, la comunicación entre el PLC y el *Second Level Controller* no ha dado ningún problema, y la implementación en el programa del FLC de los arranques y las paradas automáticos para los equipos en función de las consignas de potencia recibidas también funcionan correctamente.

El proyecto puede ya considerarse finalizado.

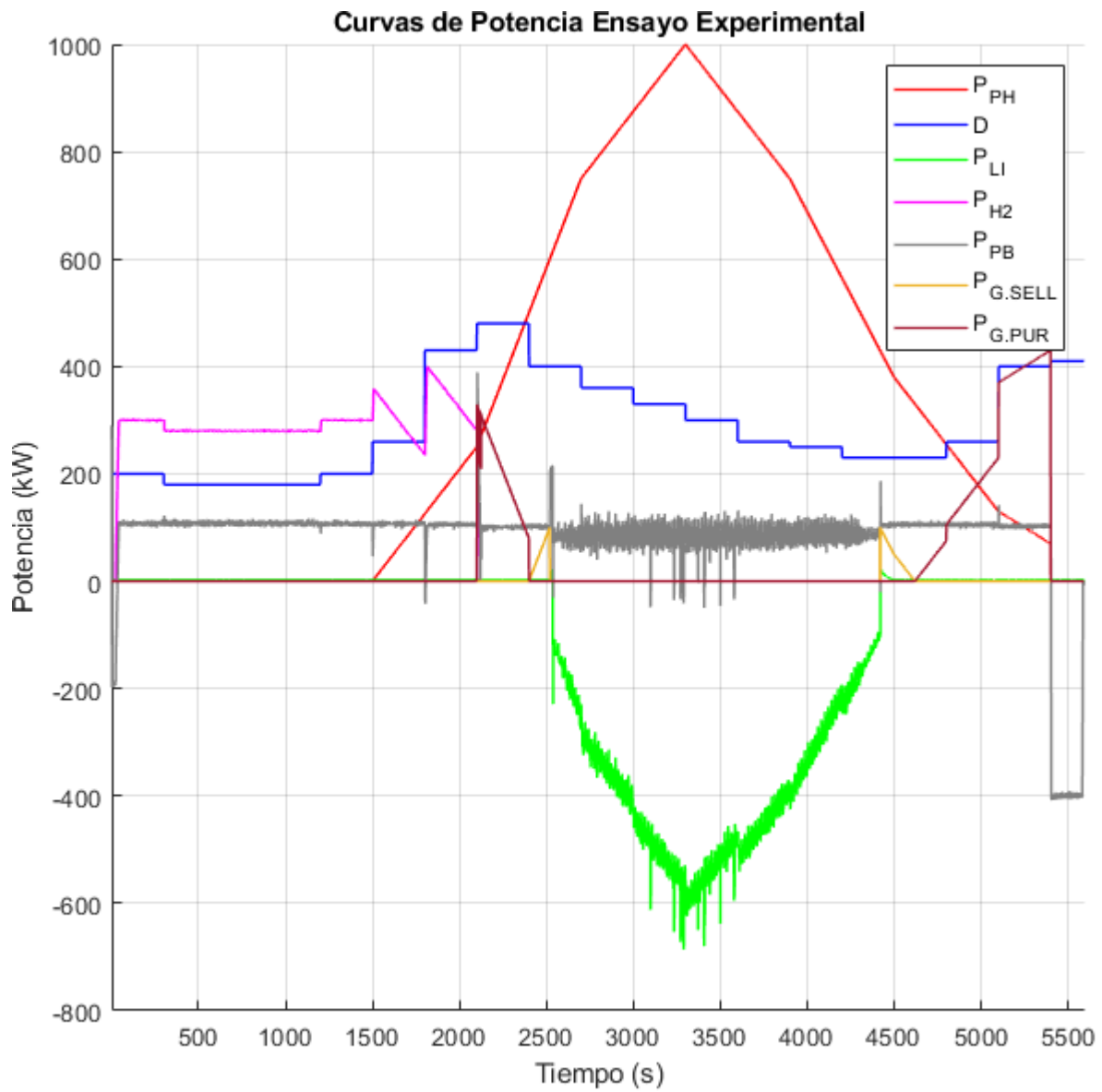


Figura 105. Curvas de potencia obtenidas en el ensayo experimental con la estrategia de control heurística basada en reglas.

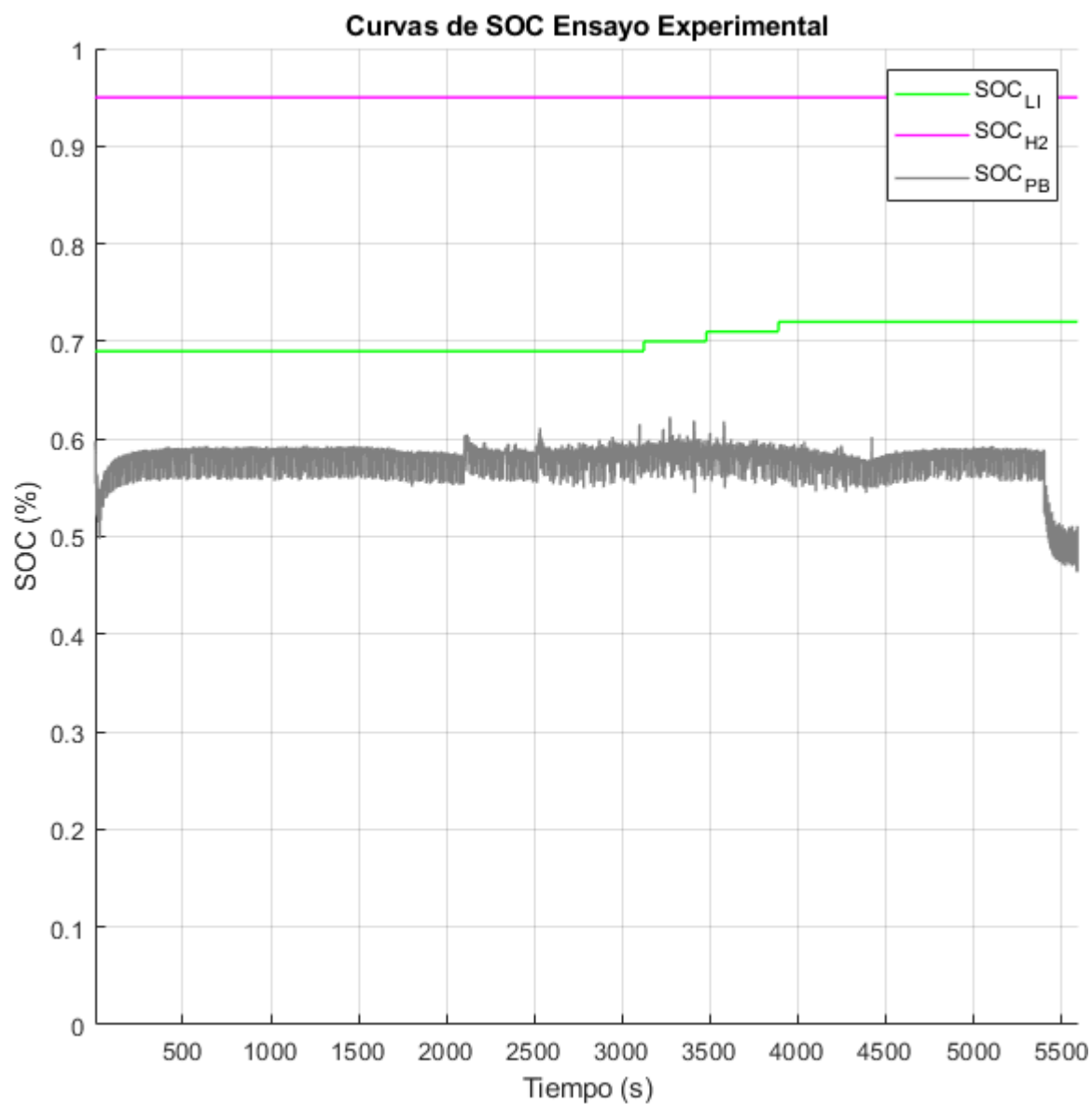


Figura 106. Curvas de SOC obtenidas en el ensayo experimental con la estrategia de control heurística basada en reglas.

6 CONCLUSIONES Y FUTURAS MEJORAS

El primero de los objetivos del presente proyecto era la integración de nuevos equipos en la Microrred para su monitorización y comando remotos desde el PLC que implementa el primer nivel de control de la planta. En el caso del sistema de generación fotovoltaico, el stack de baterías de litio, la pila de hidrógeno y sus respectivos convertidores DC/DC asociados este objetivo se ha cumplido en su totalidad.

En el caso del electrolizador, su integración no puede considerarse completa. De cara a los algoritmos y estrategias de gestión empleadas en el Segundo Nivel de Control, es necesario disponer de una medida de la potencia que consume el electrolizador, dado que dichos algoritmos y estrategias de gestión están basados en la regulación del balance de potencias en el bus principal de la Microrred. Actualmente, no se dispone de ninguna medida de la potencia consumida por el electrolizador. Ya se había planteado solventar este problema colocando un medidor de intensidad en el punto de conexión del electrolizador con el bus principal de la Microrred.

Por otro lado, en referencia aún al electrolizador, sería necesario realizar más ensayos para probar el funcionamiento del control por histéresis para la presión del buffer de salida que se ha implementado para estabilizar la producción de hidrógeno. Estos ensayos deberían ser realizados para diferentes niveles de llenado de los tanques de hidruros metálicos, y para diferentes temperaturas ambientales.

De cara a trabajos de investigación realizados contemporáneamente al presente proyecto, también ha quedado pendiente obtener un modelo matemático del electrolizador que pueda ser utilizado en estrategia de control basadas en modelos predictivos. Para ello, una vez se disponga de una medida de la potencia que consume el electrolizador, será necesario realizar nuevos ensayos. Por el momento, sólo se han obtenido caracterizaciones para la potencia consumida por los stacks del electrolizador, que no incluyen el consumo de su instrumentación.

Hay que señalar también que el modelo que se ha empleado para estimar el nivel de llenado de los tanques de hidruros fue desarrollado para un único tanque. Actualmente, se dispone de dos tanques. Es necesario, por tanto, obtener un nuevo modelo matemático para la estimación del nivel de llenado de los tanques de hidruros, y para ello habrá que realizar más ensayos experimentales.

El segundo de los objetivos del presente proyecto era automatizar la Microrred. Para ello, primero hubo que desarrollar un nuevo programa para el PLC de la planta, que implementase todas las funcionalidades requeridas para el Primer Nivel de Control. Dichas funcionalidades eran la monitorización y control remotos de todos los equipos y sistemas que integran la instalación, la detección y notificación de todas las condiciones de error y fallo que pudieran darse, conexión con el Segundo Nivel de Control, y la gestión de una serie de modos de operación que se habían establecido para la Microrred.

A la hora de definir y especificar los diferentes modos de operación de la Microrred y las condiciones de transición entre ellos, el uso de la Guía GEMMA se ha revelado como una metodología de diseño realmente poderosa, que a pesar de estar pensada para procesos de fabricación industriales en nuestro caso ha resultado realmente útil.

Por otro lado, el uso del modelo de programación estructurada propuesto por PLCopen, basado en la utilización de bloques de pretratamiento, bloques de control y comando, y un bloque para gestionar los modos de operación, ha permitido desarrollar en un tiempo relativamente corto un programa para el *First Level Controller* que implemente todas las funcionalidades requeridas, ofreciendo una solución con un elevado grado de mantenibilidad, ampliabilidad y reusabilidad, requisitos que eran deseables para posibles futuras ampliaciones de la Microrred.

Por último, se desarrolló un algoritmo de control heurístico basado en reglas para la gestión energética de la Microrred desde el Segundo Nivel de Control, más con el propósito de verificar la correcta operación de la planta al ser controlada desde dicho nivel en el Modo de Funcionamiento Remoto que con el ánimo de implementar una estrategia de control que ofreciese la máxima eficiencia y optimización.

Se realizó un ensayo experimental con el algoritmo desarrollado para comprobar que la conectividad entre el PLC y el Segundo Nivel de Control para la gestión de la Microrred se realizase correctamente. El resultado fue

positivo. Sin embargo, para completar esta funcionalidad, sería necesario añadir una señal de *heartbeat* que fuese generada por el *Second Level Controller* para el PLC, de tal manera que si el PLC deja de recibir esta señal estando en el Modo de Funcionamiento Remoto lo considerase una condición de fallo y condujese a la Microrred al estado de emergencia.

En cuanto al algoritmo de control desarrollado, ofrece una solución muy básica e intuitiva para la gestión energética de la Microrred. Sin embargo, otros tipos de estrategias de control basadas en modelos predictivos, por ejemplo, ofrecerían obviamente una mayor eficiencia y una mejor optimización económica.

7.1 ANEXO 1: Communication system

7.1.1 Introduction. Communication system general scheme

Figura 107 shows a general scheme of the physical communication system of the Microgrid. The FLC (*First Level Controller*) communicates with the entire facility equipment via several standard communication protocols.

A Modbus TCP/IP network is used for communication between the FLC and the FECs (*Front End Controllers*) of the Electrolyzer and the Lithium Battery Stack DC/DC Converter. Communication of the Weather Station with the FLC by this network is planned.

By means of a CANopen network equipped with two CAN/CANopen gateways, the FLC communicates with the BMS (*Battery Management System*) of the Lithium Battery Stack, the FECs of the Hydrogen Fuel Cell and its DC/DC Converter, and the FEC of the Photovoltaic Field DC/DC Converter. The DC/DC converter of the old electrolyzer, currently unused, also communicates with the FLC via this network.

Communications between the FLC and the Programmable Power Supply and Programmable DC Load are achieved by means of analog voltage signals, from 0 to 10 volts.

Finally, the physical communication between the FLC and the Work Station, that implements the SLC (*Second Level Controller*), is achieved by means of a USB cable.

In the following sections are specified the communication maps of all these devices, extracted from the technical documentation provided by manufacturers. Bibliographical references consulted to implement and configure the different communication networks are included and provided.

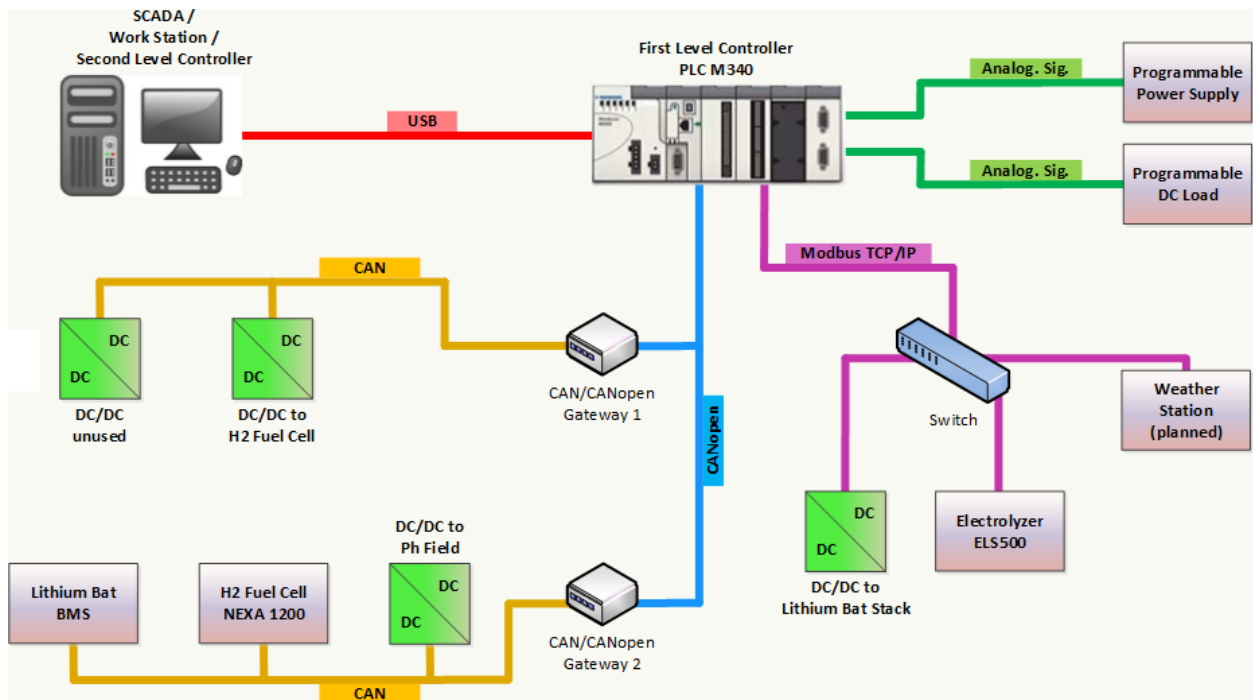


Figura 107. Communications system general scheme of the Microgrid of HyLab.

7.1.2 Communication map of ESS3 DC/DC Converter to Lithium Battery Stack (CLI)

Tabla 62. Setting features of Modbus TCP/IP for ESS3 DC/DC Converter to Lithium Battery Stack (CLI).

ESS3 DC/DC conv. Communication Features	
Protocol	Modbus TCP/IP
CLI TCP/IP Address	192.168.1.11
Modbus Slave Address	1

Tabla 63. Modbus registers of ESS3 DC/DC Converter to Lithium Battery Stack (CLI).

ESS3 DC/DC Converter Modbus registers					
ID Register	Direction	R/W	Type	Multiplier	Description
System_State	0	R	UINT16	-	System state register (Tabla 64).
System_Prot_Flags	1	R	UINT16	-	Protection flags register (Tabla 65).
System_Error_Flags	2	R	UINT16	-	Error flags register (Tabla 66).
Bat_Voltage	3	R	UINT16	0.01	Battery voltage (V).
Bat_DC_Link_Volt	4	R	UINT16	0.01	Battery DC link capacitor voltage (V).
Bus_DC_Link_Volt	5	R	UINT16	0.01	Bus DC link capacitor voltage (V).
Bus_Voltage	6	R	UINT16	0.01	Bus voltage (V).
Performance	7	R	UINT16	0.01	Performance (As a dec).
Bat_Power	8	R	UINT16	1	Battery power (W).
Bus_Power	9	R	INT16	1	Bus power (W).
Bat_Current	10	R	INT16	0.01	Battery current (A).
Bus_Current	11	R	INT16	0.01	Bus current (A).
Coils_Temp	12	R	INT16	0.01	Coils temperature (°C).
IGBT_Temp	13	R	INT16	0.01	IGBTs temperature (°C).
Command_Flags	19	W	UINT16	-	Command flags (Tabla 67).
P_set	20	W	INT16	1	Power setpoint (W, from -3000 to 3000). Negative is discharging. Positive is charging.
V_bat_lim_min	21	W	INT16	1	Minimum limit of battery voltage (V).
V_bat_lim_max	22	W	INT16	1	Maximum limit of battery voltage (V).
V_bus_lim_min	23	W	INT16	1	Minimum limit of bus voltage (V).
V_bus_lim_max	24	W	INT16	1	Maximum limit of bus voltage (V).
I_bat_lim_min	25	W	INT16	1	Minimum limit of battery current (A).
I_bat_lim_max	26	W	INT16	1	Maximum limit of battery current (A).
I_bus_lim_min	27	W	INT16	1	Minimum limit of bus current (A).
I_bus_lim_max	28	W	INT16	1	Maximum limit of bus current (A).
P_bat_lim_min	29	W	INT16	1	Minimum limit of battery power (W).
P_bat_lim_max	30	W	INT16	1	Maximum limit of battery power (W).
P_bus_lim_min	31	W	INT16	1	Minimum limit of bus power (W).
P_bus_lim_max	32	W	INT16	1	Maximum limit of bus power (W).
T_COIL_max	33	W	INT16	1	Maximum coils temperature (°C).
T_IGBT_max	34	W	INT16	1	Maximum IGBTs temperature (°C).

Tabla 64. System status flags register.

System Status Flags Register		
Code	Identifier	Description
0x0001	Syst_Wait_Starting	Waiting for starting command.
0x0002	Syst_Wait_Vbat_Vbus	Waiting for battery voltage and bus voltage.
0x0004	Syst_Precharge	Precharging
0x0008	Syst_Run	Running
0x0010	Syst_Standby	Standby
0x0020	Syst_Error	Error
0x0040	Reserved	Reserved.
0x0080	Reserved	Reserved.
0x0100	Reserved	Reserved.
0x0200	Reserved	Reserved.
0x0400	Reserved	Reserved.
0x0800	Reserved	Reserved.
0x1000	Reserved	Reserved.
0x2000	Reserved	Reserved.
0x4000	Reserved	Reserved.
0x8000	Reserved	Reserved.

Tabla 65. Protection flags register.

Protection Flags Register		
Code	Identifier	Description
0x0001	R_KBAT+	R KBAT +
0x0002	R_KBAT-	R KBAT -
0x0004	R_KBUS+	R KBUS +
0x0008	R_KBUS-	R KBUS -
0x0010	SW1_ON_OFF	SW1 ON OFF
0x0020	SW2_RST_HW	SW2 RST HW
0x0040	Reserved	Reserved.
0x0080	Reserved	Reserved.
0x0100	Reserved	Reserved.
0x0200	Reserved	Reserved.
0x0400	Reserved	Reserved.
0x0800	Reserved	Reserved.
0x1000	Reserved	Reserved.
0x2000	Reserved	Reserved.
0x4000	Reserved	Reserved.
0x8000	Reserved	Reserved.

Tabla 66. System error flags register.

System Error Flags Register		
Code	Identifier	Description
0x0001	Over_Voltage_Bat	Battery overvoltage.
0x0002	Under_Voltage_Bat	Battery undervoltage.
0x0004	Over_Voltage_Bus	Bus overvoltage.
0x0008	Under_Voltage_Bus	Bus undervoltage.
0x0010	Over_Current_Bat	Battery overcurrent.
0x0020	Under_Current_Bat	Battery undercurrent.
0x0040	Over_Current_Bus	Bus overcurrent.
0x0080	Under_Current_Bus	Bus undercurrent.
0x0100	Over_Power_Bat	Battery overpower.
0x0200	Under_Power_Bat	Battery underpower.
0x0400	Over_Power_Bus	Bus overpower.
0x0800	Under_Power_Bus	Bus underpower.
0x1000	High_Temp_IGBT	IGBTs high temperature.
0x2000	High_Temp_COIL	Coils high temperature.
0x4000	Err_Driver	Driver error.
0x8000	Err_Pre_Charge	Precharge error.

Tabla 67. Command flags register.

Command Flags Register		
Code	Identifier	Description
0x0001	START_STOP	Start / Stop command flag. 1=Start. 0=Stop.
0x0002	RST_SW	Software reset command flag. 1=Reset. 0=Not reset.
0x0004	RST_LIMITS	Limits reset command flag. 1=Reset. 0=Not reset.
0x0008	Reserved	Reserved.
0x0010	Reserved	Reserved.
0x0020	Reserved	Reserved.
0x0040	Reserved	Reserved.
0x0080	Reserved	Reserved.
0x0100	Reserved	Reserved.
0x0200	Reserved	Reserved.
0x0400	Reserved	Reserved.
0x0800	Reserved	Reserved.
0x1000	Reserved	Reserved.
0x2000	Reserved	Reserved.
0x4000	Reserved	Reserved.
0x8000	Reserved	Reserved.

7.1.3 Communication map of Acta Heliocentris EL500 Electrolyzer (EZ)

Tabla 68. Setting features of Modbus TCP/IP for EL500 electrolyzer (EZ).

EL500 Communication Features	
Protocol	Modbus TCP/IP
CLI TCP/IP Address	192.168.1.222
Modbus Slave Address	-

Tabla 69. Modbus registers of EL500 electrolyzer (EZ).

EL500 Electrolyzer Modbus registers					
ID Register	Direction	R/W	Type	Multiplier	Description
Actual_State	128	R	UINT16	-	Electrolyzer state register (Tabla 70).
Actual_Errors	133	R	UINT16	-	Electrolyzer error register (Tabla 71).
Actual_Alarms	134	R	UINT16	-	Electrolyzer alarm register (Tabla 72).
Dryer_temp_0	135	R	REAL	0.00233	Dryer temperature pipeline 0 (°C).
Dryer_temp_1	137	R	REAL	0.00233	Dryer temperature pipeline 1 (°C).
H2_flow_rate	139	R	REAL	0.00233	Hydrogen flow rate (NI/h).
Stack_1_time	141	R	UINT32	1	Production lifetime of stack 1 (s).
Stack_2_time	143	R	UINT32	1	Production lifetime of stack 2 (s).
Stack_1_n_cycles	149	R	UINT16	1	Number of production cycles of stack 1.
Stack_2_n_cycles	150	R	UINT16	1	Number of production cycles of stack 2.
Water_Temp_Mod_A	153	R	REAL	2.33e-7	Temperature of Module A water tank (°C).
Water_Temp_Mod_B	155	R	REAL	2.33e-7	Temperature of Module B water tank (°C).
Press_sensor_0	159	R	REAL	2.33e-7	Module A stack pressure sensor (bar).
Press_sensor_2	163	R	REAL	2.33e-7	Module A buffer pressure sensor (bar).
Fan_speed_0	167	R	REAL	2.33e-7	Speed of Module A fan 1 (rpm).
Fan_speed_2	171	R	REAL	2.33e-7	Speed of Module A fan 2 (rpm).
Fan_speed_4	175	R	REAL	2.33e-7	Speed of dryer fan.
Stack_1_volt	179	R	REAL	2.33e-7	Stack 1 voltage (V).
Stack_2_volt	181	R	REAL	2.33e-7	Stack 2 voltage (V).
Stack_1_cur	187	R	REAL	2.33e-7	Stack 1 current (A).
Stack_2_cur	189	R	REAL	2.33e-7	Stack 2 voltage (A).
Total_H2	195	R	REAL	0.233	Total produced hydrogen (NI).
Output_press	208	R	REAL	2.33e-7	Output electrolyzer pressure (bar).
Dryer_press	210	R	REAL	2.33e-7	Output dryer pressure (bar).
Stack_A_power	217	R	UINT16	1	Module A stacks power consumption (W).
Dryer_state	219	R	UINT16	-	Dryer state register (Tabla 73).
Dryer_error	220	R	UINT16	-	Dryer error register (Tabla 74).
Start_comm	032	W	UINT16	-	Start command register. 0xFF00 set start bits. 0x0000 reset start bits.
Stop_comm	033	W	UINT16	-	Stop command register. 0xFF00 set stop bits. 0x0000 reset stop bits.
Reset_comm	034	W	UINT16	-	Reset command register. 0xFF00 set reset bits. 0x0000 reset reset bits.
H2_flow_Set	812	W	UINT16	1	Electrolyzer H2 flow setpoint (% , from 21 to 100).

Tabla 70. EL500 electrolyzer state register code.

System State Register Code			
State Code (hex)	Substate Code (hex)	State	Substate
0x10	0x10	Power On	
0x11	0x10	Standby	Wait Start Command
	0x11		Wait Power Condition
	0x12		Restart with Max Pressure
	0x13		Delay for DC-DC
	0x14		Hydration
0x12	0x10	Ramp Up	
0x13	0x10	Steady	
0x14	0x10	Ramp Down	Ramp Down Phase 1
	0x11		Ramp Down Phase 2
0x15	0x10	Purge	
0x16	0x10	Heating	
0x01	0x10	Error Status	Next Substatus Selection
	0x11		Error
	0x12		Alarm Low Water
	0x13		Alarm High Temperature
	0x14		Alarm Low Temperature
	0x16		Alarm Low Battery

Tabla 71. EL500 electrolyzer error flags register.

Error Flags Register		
Code	Identifier	Description
0x0001	FLOW_SWITCH	Flow switch
0x0002	FAN	Fan
0x0004	PRESSURE_SWITCH	Pressure switch
0x0008	WATER_LEVEL_SENSOR	Water level sensor
0x0010	STACK_CURRENT	Stack current
0x0020	STACK_VOLTAGE	Stack voltage
0x0040	Reserved	Reserved
0x0080	LEAK_STACK	Refill
0x0100	Reserved	Reserved
0x0200	REFILL	Refill
0x0400	Reserved	Reserved
0x0800	PRESSURE_SENSOR	Pressure sensor
0x1000	TEMPERATURE_SENSOR	Temperature sensor
0x2000	DRYER	Dryer
0x4000	LEAK_DRYER	Leak dryer.
0x8000	WATER_PURIFIER	Water purifier.

Tabla 72. EL500 electrolyzer alarm flags register.

Alarm Flags Register		
Code	Identifier	Description
0x0001	HIGH_TEMPERATURE	Flow switch
0x0002	LOW_WATER	Fan
0x0004	LOW_TEMPERATURE	Pressure switch
0x0008	Reserved	Water level sensor
0x0010	LOW_BATTERY	Stack current

Tabla 73. EL500 electrolyzer dryer state register code.

Dryer State Register Code			
State Code (hex)	Substate Code (hex)	State	Substate
0x11	0x10	Standby	Wait the output electrolyzer pressure to 0 bar.
	0x11		Wait electrolyzer start command.
0x12	0x10	Dryer 0	
	0x11		
	0x12		
	0x13		
	0x14		
0x13	0x10	Dryer 1	
	0x11		
	0x12		
	0x13		
	0x14		
0x01	0x10	Leak test	Electrolyzer leak test configuration.
	0x11		Dryer leak test configuration.

Tabla 74. EL500 electrolyzer dryer error flags register.

Dryer Error Flags Register		
Code	Identifier	Description
0x0001	TEMP_SENS_1	Sensor temperature 1
0x0002	TEMP_SENS_2	Sensor temperature 2
0x0004	HEATER_1	Heater 1
0x0008	HEATER_2	Heater 2
0x0010	PRESS_SWITCH_0	Pressure switch 0
0x0020	PRESS_SWITCH_1	Pressure switch 1
0x0040	DR_FAN_ERROR	Driver fan error.
0x0080	Reserved	Reserved.
0x0100	Reserved	Reserved.
0x0200	Reserved	Reserved.
0x0400	Reserved	Reserved.
0x0800	Reserved	Reserved.
0x1000	Reserved	Reserved.
0x2000	Reserved	Reserved.
0x4000	Reserved	Reserved.
0x8000	Reserved	Reserved.

7.1.4 Communication map of Win Inertia DC/DC Converter to H2 Fuel Cell (CFC)

Tabla 75. Setting features of CAN for Win Inertia DC/DC Converter to H2 Fuel Cell (CFC).

Communication Features	
Protocol	CAN 2.0
Baudrate	unknown
Type of Frame	Standard (ID 11 bits)

Tabla 76. CAN frames of Win Inertia DC/DC Converter to H2 Fuel Cell (CFC).

Win Inertia DC/DC CAN Frames							
Identifier	Length (bytes)	Period (ms)	T/R	Byte Number	Description	Type	Multiplier
Unknown	8	Unkn	T	0 (MSB)	Reserved.	-	-
				1	Status (Tabla 77).	UINT8	-
				2	Error flags 1 (Tabla 78).	UINT8	-
				3	Error flags 2 (Tabla 79).	UINT8	-
				4	Received power setpoint (4 HB / 7 LB). 0.00...1200.00. W.	REAL	1
				5			
				6			
7 (LSB)							
Unknown	8	Unk	T	0 (MSB)	Output bus voltage (0 HB / 3 LB). V.	REAL	1
				1			
				2			
				3			
				4	Input bus voltage (4 HB / 7 LB). V.	REAL	1
				5			
				6			
7 (LSB)							
Unknown	8	Unk	T	0 (MSB)	Output bus current (0 HB / 3 LB). A.	REAL	1
				1			
				2			
				3			
				4	Input bus current (4 HB / 7 LB). A.	REAL	1
				5			
				6			
7 (LSB)							
Unknown	8	Unk	R	0 (MSB)	Reserved.	-	-
				1	PLC Status (1 On / 0 Off).	UINT8	-
				2	Reserved.	-	-
				3	Command (Tabla 80).	UINT8	-
				4	Power setpoint (4 HB / 7 LB). 0.00...1200.00. W.	REAL	1
				5			
				6			
7 (LSB)							

Tabla 77. Win Inertia DC/DC state register code.

Win Inertia DC/DC State Register Code		
Code	Identifier	Description
0x00	STOP	Stop.
0x01	START_I	Starting in Current Mode.
0x02	START_P	Starting in Power Mode.
0x03	RUN_I	Running in Current Mode.
0x04	RUN_P	Running in Power Mode.
0x05	ERROR	Error.

Tabla 78. Win Inertia DC/DC error flags register 1.

Win Inertia DC/DC Error Flags Register 1		
Code	Identifier	Description
0x01	Reserved	Reserved.
0x02	FC_OVERCURRENT	Fuel cell overcurrent.
0x04	PERM_OVERLOAD	Permissible overload.
0x08	NONPERM_OVERLOAD	Non-permissible overload.
0x10	WATCHDOG	Watchdog.
0x20	Reserved	Reserved.
0x40	Reserved	Reserved.
0x80	Reserved	Reserved.

Tabla 79. Win Inertia DC/DC error flags register 2.

Win Inertia DC/DC Error Flags Register 2		
Code	Identifier	Description
0x01	DRIVER	Driver.
0x02	OVERTEMP	Overtemperature.
0x04	BUS_OVERVOLT	Bus overvoltage.
0x08	BUS_UNDERVOLT	Bus undervoltage.
0x10	Reserved	Reserved.
0x20	Reserved	Reserved.
0x40	FC_OVERVOLT	Fuel cell overvoltage.
0x80	FC_UNDERVOLT	Fuel cell undervoltage.

Tabla 80. Win Inertia DC/DC command flags register.

Win Inertia DC/DC Command Flags Register		
Code	Identifier	Description
0x01	STOP	Stop.
0x02	START_I	Start in current mode.
0x04	START_P	Start in power mode.
0x08	RESET	Reset.

7.1.5 Communication map of NEXA 1200 H2 Fuel Cell (FC)

Tabla 81. Setting features of CAN for Acta Heliocentris NEXA 1200 H2 fuel cell (FC).

Communication Features	
Protocol	CAN 2.0A
Baudrate	500 K
Type of Frame	Standard (ID 11 bits)

Tabla 82. CAN frames of Acta Heliocentris NEXA 1200 H2 Fuel Cell (FC).

NEXA 1200 FC CAN Frames							
Identifier	Length (bytes)	Period (ms)	T/R	Byte Number	Description	Type	Multiplier
0x100	8	25	T	0 (MSB)	Stack voltage (0 HB / 1 LB). -1000...5000. Volts x 100.	INT16	100
				1			
				2	Stack current (2 HB / 3 LB). 0...10000. Amps x 100.	INT16	100
				3			
				4	System current (4 HB / 5 LB). 0...10000. Amps x 100.	INT16	100
				5			
				6	Reserved	-	-
0x110	8	100	T	7 (LSB)	Reserved	-	-
				0 (MSB)	Stack temperature (0 HB / 1 LB). -200...7500. °C x 100.	INT16	100
				1			
				2	Warning flags 1 (Tabla 83).	UINT8	-
				3	Warning flags 2 (Tabla 84).	UINT8	-
				4	H2 concentration (4 HB / 5 LB). 0...10000. ppm	INT16	1
				5			
0x200	8	50	T	6	Reserved.	-	-
				7 (LSB)	Reserved.	-	-
				0 (MSB)	Reserved.	-	-
				1	System pressure (1 HB / 2 LB). -1000...7000. mbar x 10.	INT16	10
				2			
				3	System voltage (3 HB / 4 LB). -1000...5000. Volts x 100.	INT16	100
				4			
0x210	8	50	T	5	Ambient temperature (5 HB / 6 LB). -2000...10000. °C x 100.	INT16	100
				6			
				7 (LSB)	System state (Tabla 85).	UINT8	-
				0 (MSB)	Fan speed (0 HB / 1 LB). 0...5000. rpm.	UINT16	1
				1			
				2	Reserved.	-	-
				3	Reserved.	-	-
0x300	8	-	T	4	Reserved.	-	-
				5	Information flags (Tabla 86).	UINT8.	-
				6	H2 inlet pressure. 0...2500. bar x 100.	INT16.	100
				7 (LSB)			
				0 (MSB)	Reserved.	-	-
				1	Reserved.	-	-
				2	Reserved.	-	-
0x500	8	Acycl	R	3	Error flags 1 (Tabla 87).	UINT8	-
				4	Error flags 2 (Tabla 88).	UINT8	-
				5	Error flags 3 (Tabla 89).	UINT8	-
				6	Error flags 4 (Tabla 90).	UINT8	-
				7 (LSB)	Reserved.	-	-
				0 (MSB)	Parameter code.	UINT8	-
				1	System command (Tabla 91).	UINT8	-
				2	Reserved.	-	-
				3	Reserved.	-	-
				4	Reserved.	-	-
				5	Reserved.	-	-
				6	Reserved.	-	-
				7 (LSB)	Reserved.	-	-

Tabla 83. NEXA 1200 FC warning flags register 1.

NEXA 1200 FC Warning Flags Register 1		
Code	Identifier	Description
0x01	H2_PRESS_HIGH	H2 operating pressure too high.
0x02	H2_PRESS_LOW	H2 operating pressure too low.
0x04	Reserved	Reserved.
0x08	V_SYS_LOW	System voltage too low.
0x10	V_FC_LOW	FC voltage too low.
0x20	I_SYS_LOW	System current too low.
0x40	I_SYS_HIGH	System current too high.
0x80	I_FC_HIGH	FC current too high.

Tabla 84. NEXA 1200 FC warning flags register 2.

NEXA 1200 FC Warning Flags Register 2		
Code	Identifier	Description
0x01	H2_PRI_PRESS_LOW	H2 primary pressure too low.
0x02	Reserved	Reserved.
0x04	FAN_SPEED	Fan speed.
0x08	FC_TEMP_HIGH	FC temperature too high.
0x10	FC_TEMP_LOW	FC temperature too low.
0x20	AMB_TEMP_HIGH	Ambient temperature too high.
0x40	AMB_TEMP_LOW	Ambient temperature too low.
0x80	H2_CON_HIGH	H2 concentration too high.

Tabla 85. NEXA 1200 FC system state register code.

NEXA 1200 FC System State Register Code		
Code	Identifier	Description
0x00	SYST_INIT	System initializing.
0x01	OFF	Off.
0x02	STANDBY	Standby.
0x03	START	Start.
0x04	Reserved	Reserved.
0x05	OPERATING	Operating (Run).
0x06	CATAL_CLEAN	Catalyst clean.
0x07	SHUTDOWN	Shutdown.
0x08	Reserved	Reserved.
0x09	ERROR	Error.
0x0A	Reserved	Reserved.

Tabla 86. NEXA 1200 FC information flags register.

NEXA 1200 FC Information Flags Register Code		
Code	Identifier	Description
0x01	EXT_H2_VALVE	State external hydrogen valve.
0x02	INT_H2_VALVE	State internal hydrogen valve.
0x04	PUR_VALVE	State purge valve.
0x08	Reserved	Reserved.
0x10	POWER_RELAY	State power relay.
0x20	Reserved	Reserved.
0x40	INT_EXT_SUPPLY	State internal / external supply.
0x80	START_BUTTON	State start button.

Tabla 87. NEXA 1200 FC error flags register 1.

NEXA 1200 FC Error Flags Register 1		
Code	Identifier	Description
0x01	SYST_VOLT_LOW	System voltage too low.
0x02	SYST_VOLT_HIGH	System voltage too high.
0x04	FC_VOLT_LOW	FC-Voltage too low.
0x08	FC_VOLT_HIGH	FC-Voltage too high.
0x10	SYST_CURRENT_LOW	System current too low.
0x20	SYST_CURRENT_HIGH	System current too high.
0x40	FC_CURRENT_LOW	FC-Current too low.
0x80	FC_CURRENT_HIGH	FC-Current too high.

Tabla 88. NEXA 1200 FC error flags register 2.

NEXA 1200 FC Error Flags Register 2		
Code	Identifier	Description
0x01	PRIMARY_PRESS_LOW	Primary pressure too low.
0x02	PRIMARY_PRESS_HIGH	Primary pressure too high.
0x04	OPERAT_PRESS_LOW	Operating pressure too low.
0x08	OPERAT_PRESS_HIGH	Operating pressure too high.
0x10	Reserved	Reserved.
0x20	Reserved	Reserved.
0x40	Reserved	Reserved.
0x80	Reserved	Reserved.

Tabla 89. NEXA 1200 FC error flags register 3.

NEXA 1200 FC Error Flags Register 3		
Code	Identifier	Description
0x01	Reserved	Reserved.
0x02	FAN_SPEED	Fan speed.
0x04	FC_TEMP_LOW	FC-temperature passed lower limit.
0x08	FC_TEMP_HIGH	FC-temperature exceeded.
0x10	AMB_TEMP_LOW	Ambient temperature passed lower limit.
0x20	AMB_TEMP_HIGH	Ambient temperature exceeded.
0x40	H2_SENSOR_FAIL	H2 sensor failed.
0x80	H2_CONCENT_HIGH	H2 concentration too high.

Tabla 90. NEXA 1200 FC error flags register 4.

NEXA 1200 FC Error Flags Register 4		
Code	Identifier	Description
0x01	Reserved	Reserved.
0x02	Reserved	Reserved.
0x04	Reserved	Reserved.
0x08	Reserved	Reserved.
0x10	EM_STOP	Emergency stop.
0x20	EM_STOP_EXT_CUTOFF	Emergency stop external cut off.
0x40	EM_STOP_OVERCURR	Emergency stop overcurrent safety chain.
0x80	EM_STOP_SENSWERTE	Emergency stop sensorwerte.

Tabla 91. NEXA 1200 FC command flags register.

NEXA 1200 FC Command Flags Register		
Code	Identifier	Description
0x02	RESET	System reset in case of error.
0x03	START	System start from standby mode.
0x06	STOP	System stop.

7.1.6 Communication map of Lite Power BMS for Lithium Battery Stack (Li)

Tabla 92. Setting features of CAN for Lite Power BMS of lithium battery stack (Li).

Communication Features	
Protocol	CAN 2.0A
Baudrate	500 K
Type of Frame	Standard (ID 11 bits)

The BMS device for the lithium battery stack uses a proprietary protocol named Broadcaster v3.1 over CAN 2.0A. By means of this protocol, all BMS measurements, parameters, state registers and error/alarm flags are sent by a single CAN frame, with the identifier 0x04D and a period of 50 ms, using the frame format shown in the Tabla 94, which is encapsulated in the data field of the CAN frame.

The values of the fields that make up the Broadcaster frame are expressed in ASCII format. This is due to Broadcaster was thought only for monitoring from a TFT display that uses this format, and not to connect the BMS with a PLC or other type of devices.

Tabla 93. CAN frames of Lite Power BMS of lithium battery stack (Li).

BMS Lithium Battery Stack CAN Frames							
Identifier	Length (bytes)	Period (ms)	T/R	Byte Number	Description	Type	Multiplier
0x04D	8	50	T	0 (MSB)	Broadcasting v3.1 INDEX Character 1	ASCII	-
				1	Broadcasting v3.1 INDEX Character 2	ASCII	-
				2	Broadcasting v3.1 PARAM Character 1	ASCII	-
				3	Broadcasting v3.1 VALUE Character 1	ASCII	-
				4	Broadcasting v3.1 VALUE Character 2	ASCII	-
				5	Broadcasting v3.1 VALUE Character 3	ASCII	-
				6	Broadcasting v3.1 VALUE Character 4	ASCII	-
				7 (LSB)	Broadcasting v3.1 VALUE Character 5	ASCII	-

Tabla 94. Broadcaster v3.1 frame structure.

Broadcaster V3.1 Frame Structure							
INDEX		PARM	VALUE				
Byte 0 (MSB)	Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte 5	Byte 6	Byte 7 (LSB)

Tabla 95. BMS lithium battery stack Broadcaster v3.1 frames (part 1).

BMS Lithium Battery Stack Broadcaster v3.1 frames			
Index	Parameter	Label	Description
'00' (0x30 / 0x30)	'%' (0x25)	Info_Reg_Count	Total number of information registers.
'01' (0x30 / 0x31)	'%' (0x25)	Official_Cell_Count	The official cell count is either the specified cell count or the number of cells found by a test.
'02' (0x30 / 0x32)	'%' (0x25)	Observed_Cell_Count	The observed cell count is the actual number of cells found in the pack. This number is recalculated on each scan of the pack.
'03' (0x30 / 0x33)	'%' (0x25)	Avg_Cell_Temp	Average cell temperature. °C.
'04' (0x30 / 0x34)	'%' (0x25)	Avg_Cell_Voltage	Average cell voltage. mV.
'05' (0x30 / 0x35)	'%' (0x25)	Max_Cell_Temp	The highest temperature found on any cell. °C.
'06' (0x30 / 0x36)	'%' (0x25)	Max_Cell_Temp_Index	The index number of the cell with the highest temp.
'07' (0x30 / 0x37)	'%' (0x25)	Max_Cell_Voltage	The highest voltage found on any cell during the last scan. mV.
'08' (0x30 / 0x38)	'%' (0x25)	Max_Cell_Voltage_Index	The index number of the cell with the highest voltage.
'09' (0x30 / 0x39)	'%' (0x25)	Min_Cell_Voltage	The lowest voltage found on any cell during the last scan. mV.
'0A' (0x30 / 0x41)	'%' (0x25)	Min_Cell_Voltage_Index	The index number of the cell with the lowest voltage.
'0B' (0x30 / 0x42)	'%' (0x25)	Stack_Voltage	Stack voltage. mV.
'0C' (0x30 / 0x43)	'%' (0x25)	Stack_Current	Stack current. A x 10.
'0D' (0x30 / 0x44)	'%' (0x25)	SOC	State of charge. (0...100). %.
'0E' (0x30 / 0x45)	'%' (0x25)	Stack_Alert	The current alert being presented on the display.
'0F' (0x30 / 0x46)	'%' (0x25)	Timestamp	Timestamp of the last sample.
'00' (0x30 / 0x30)	's' (0x73)	Alarm_Account	Total number of errors.
'01' (0x30 / 0x31)	's' (0x73)	Pack_Normal	The normal operation alert is post when there are no other valid errors. Level: Information.
'02' (0x30 / 0x32)	's' (0x73)	Cell_Temp_Too_High	When a cell temperature exceeds the max defined temperature for a cell this alarm alert is posted. Level: Alarm.
'03' (0x30 / 0x33)	's' (0x73)	Stack_Volt_Too_High	When the stack voltage exceeds the max defined voltage for the stack this error alert is posted. Level: Alarm.
'04' (0x30 / 0x34)	's' (0x73)	Stack_Volt_High	This warning alert is presented when the stack voltage is off the scale, higher that High Voltage Setting but less that the Stack Max Voltage setting. Level: Warning.
'05' (0x30 / 0x35)	's' (0x73)	Stack_Volt_Too_Low	When the stack voltage comes down the min defined voltage for the stack this error alert is posted. Level: Alarm.
'06' (0x30 / 0x36)	's' (0x73)	Stack_Volt_Low	This warning alert is presented when the stack voltage is off the scale, lower that Low Voltage Setting but bigger that the Stack Min Voltage setting. Level: Warning.
'07' (0x30 / 0x37)	's' (0x73)	Stack_Current_Too_High	When the stack current exceeds the max defined current for the stack this error alert is posted. Level: Alarm.
'08' (0x30 / 0x38)	's' (0x73)	Stack_Current_High	This warning alert is presented when the stack current is off the scale. Level: Warning.
'09' (0x30 / 0x39)	's' (0x73)	Stack_Chassis_Connect	Stack to chassis connection detected. Level: Fault.
'0A' (0x30 / 0x41)	's' (0x73)	Stack_Cell_Comm_Error	This fault is reported when the official cell count is different of observed cell count. Level: Fault.
'0B' (0x30 / 0x42)	's' (0x73)	System_Error	The system error is a software detected condition that has not been defined. Level: Fault.

Tabla 96. BMS lithium battery stack Broadcaster v3.1 frames (part 2).

BMS Lithium Battery Stack Broadcaster v3.1 frames			
Index	Parameter	Label	Description
'00' (0x30 / 0x30)	't' (0x74)	Number_of_Cells	Total number of cells.
'01' (0x30 / 0x31)	't' (0x74)	Cell_01_Temp	Cell 01 temperature. °C.
'02' (0x30 / 0x32)	't' (0x74)	Cell_02_Temp	Cell 02 temperature. °C.
'03' (0x30 / 0x33)	't' (0x74)	Cell_03_Temp	Cell 03 temperature. °C.
'04' (0x30 / 0x34)	't' (0x74)	Cell_04_Temp	Cell 04 temperature. °C.
'05' (0x30 / 0x35)	't' (0x74)	Cell_05_Temp	Cell 05 temperature. °C.
'06' (0x30 / 0x36)	't' (0x74)	Cell_06_Temp	Cell 06 temperature. °C.
'07' (0x30 / 0x37)	't' (0x74)	Cell_07_Temp	Cell 07 temperature. °C.
'08' (0x30 / 0x38)	't' (0x74)	Cell_08_Temp	Cell 08 temperature. °C.
'09' (0x30 / 0x39)	't' (0x74)	Cell_09_Temp	Cell 09 temperature. °C.
'0A' (0x30 / 0x41)	't' (0x74)	Cell_10_Temp	Cell 10 temperature. °C.
'0B' (0x30 / 0x42)	't' (0x74)	Cell_11_Temp	Cell 11 temperature. °C.
'0C' (0x30 / 0x43)	't' (0x74)	Cell_12_Temp	Cell 12 temperature. °C.
'0D' (0x30 / 0x44)	't' (0x74)	Cell_13_Temp	Cell 13 temperature. °C.
'0E' (0x30 / 0x45)	't' (0x74)	Cell_14_Temp	Cell 14 temperature. °C.
'0F' (0x30 / 0x46)	't' (0x74)	Cell_15_Temp	Cell 15 temperature. °C.
'10' (0x31 / 0x30)	't' (0x74)	Cell_16_Temp	Cell 16 temperature. °C.
'00' (0x30 / 0x30)	'v' (0x76)	Number_of_Cells	Total number of cells.
'01' (0x30 / 0x31)	'v' (0x76)	Cell_01_Voltage	Cell 01 voltage. mV.
'02' (0x30 / 0x32)	'v' (0x76)	Cell_02_Voltage	Cell 02 voltage. mV.
'03' (0x30 / 0x33)	'v' (0x76)	Cell_03_Voltage	Cell 03 voltage. mV.
'04' (0x30 / 0x34)	'v' (0x76)	Cell_04_Voltage	Cell 04 voltage. mV.
'05' (0x30 / 0x35)	'v' (0x76)	Cell_05_Voltage	Cell 05 voltage. mV.
'06' (0x30 / 0x36)	'v' (0x76)	Cell_06_Voltage	Cell 06 voltage. mV.
'07' (0x30 / 0x37)	'v' (0x76)	Cell_07_Voltage	Cell 07 voltage. mV.
'08' (0x30 / 0x38)	'v' (0x76)	Cell_08_Voltage	Cell 08 voltage. mV.
'09' (0x30 / 0x39)	'v' (0x76)	Cell_09_Voltage	Cell 09 voltage. mV.
'0A' (0x30 / 0x41)	'v' (0x76)	Cell_10_Voltage	Cell 10 voltage. mV.
'0B' (0x30 / 0x42)	'v' (0x76)	Cell_11_Voltage	Cell 11 voltage. mV.
'0C' (0x30 / 0x43)	'v' (0x76)	Cell_12_Voltage	Cell 12 voltage. mV.
'0D' (0x30 / 0x44)	'v' (0x76)	Cell_13_Voltage	Cell 13 voltage. mV.
'0E' (0x30 / 0x45)	'v' (0x76)	Cell_14_Voltage	Cell 14 voltage. mV.
'0F' (0x30 / 0x46)	'v' (0x76)	Cell_15_Voltage	Cell 15 voltage. mV.
'10' (0x31 / 0x30)	'v' (0x76)	Cell_16_Voltage	Cell 16 voltage. mV.

7.1.7 Communication map of Studer VarioString VS-70 DC/DC Converter to Photovoltaic Field (CPH)

Tabla 97. Setting features of CAN for Studer Variostring VS-70 DC/DC converter to photovoltaic field (CPH).

Communication Features	
Protocol	CAN 2.0B
Baudrate	500 K
Type of Frame	Extended (ID 29 bits)

The communication system for Variostring VS-70, composed of the RCC-02 device (for remote control) and a Xcom/CAN gateway, uses a proprietary protocol named Xtender Serial over CAN 2.0B for monitoring of measurements, and reading/writing of parameters. There are different CAN frames for reading request of measurements, reading response after valid reading request, and writing of commands. Identifiers for these CAN frames depends on the VS-70 DC/DC and Xcom/CAN gateway directions, and the type of service demanded. Tabla 98, Tabla 99 and Tabla 100 show CAN frames for our case, obtained according to the Technical Specification of Studer Public Protocol for Xcom-CAN.

Tabla 98. Xtender Serial CAN frame for reading request to single VS-70 DC/DC.

Xtender Serial CAN Frame for Reading Request	
CAN Identifier	CAN Data
0x15E80200 (29 bits)	Info ID (16 bits)

Tabla 99. Xtender Serial CAN frame for reading response to single VS-70 DC/DC.

Xtender Serial CAN Frame for Reading Response		
CAN Identifier	CAN DATA	
0x000D7A00 (29 bits)	Info ID (16 bits)	Value (32 bits)

Tabla 100. Xtender Serial CAN frame for writing of On/Off command to single VS-70 DC/DC.

Xtender Serial CAN Frame for Writing of On/Off Command			
CAN Identifier	CAN DATA		
0x15E80280 (29 bits)	Info ID (16 bits)	Part (8 Bits) 0x00 Write in Flash 0x04 Write in RAM	Value (32 bits)

Tabla 101. VS-70 DC/DC converter measurement registers.

VS-70 Measurement Registers		
Info ID	Label	Description
15004	PH_Voltage	Photovoltaic field voltage. V.
15007	PH_Current	Photovoltaic field current. A.
15010	PH_Power	Photovoltaic power. W.
15000	Out_Bus_Voltage	Output bus voltage. V.
15001	Out_Bus_Current	Output bus current. A.
15033	PH_Max_Voltage	Photovoltaic field maximum voltage. V.
15037	PH_Max_Power	Photovoltaic field maximum power. W.
15040	Out_Bus_Max_Voltage	Output bus maximum voltage. V.
15041	Out_Bus_Min_Voltage	Output bus minimum voltage. V.
15035	Out_Bus_Max_Current	Output bus maximum current. A.
15030	PH_Irr_Time	Photovoltaic field irradiation time of the current day. Hours.
15016	PH_Energy_Ah	Photovoltaic field generated energy of the current day. Ah.
15017	PH_Energy_kWh	Photovoltaic field generated energy of the current day. kWh.
15023	PH_Total_Energy_MWh	Photovoltaic field total generated energy. MWh.

Tabla 102. VS-70 DC/DC converter command registers.

VS-70 Command Registers		
Info ID	Label	Description
14039	Stop_Comm	Stop command. Write 0x00000001 in value field of CAN frame for stop request.
14038	Start_Comm	Start command. Write 0x00000001 in value field of CAN frame for start request.

7.1.8 Communication map of CAN/CANopen Gateway 1

Tabla 103. Setting features of CAN/CANopen Gateway 1.

Communication Features	
Protocol	CANopen
ID Device	1
Baudrate	125 K

Tabla 104. CANopen object dictionary of CAN/CANopen Gateway 1.

CAN/CANopen Gateway 1 CANopen Object Dictionary							
Com Object ID	Type	Equipment	Length (bytes)	Byte Number	Description	Type	Multiplier
0x181	TPDO	CFC	8	0 (MSB)	Reserved.	-	-
				1	Status (Tabla 77).	UINT8	-
				2	Error flags 1 (Tabla 78).	UINT8	-
				3	Error flags 2 (Tabla 79).	UINT8	-
				4	Received power setpoint (4 HB / 7 LB). 0.00...1200.00. W.	REAL	1
				5			
				6			
				7 (LSB)			
0x281	TPDO	CFC	8	0 (MSB)	Output bus voltage (0 HB / 3 LB). V.	REAL	1
				1			
				2			
				3			
				4	Input bus voltage (4 HB / 7 LB). V.	REAL	1
				5			
				6			
				7 (LSB)			
0x381	TPDO	CFC	8	0 (MSB)	Output bus current (0 HB / 3 LB). A.	REAL	1
				1			
				2			
				3			
				4	Input bus current (4 HB / 7 LB). A.	REAL	1
				5			
				6			
				7 (LSB)			
0x201	RPDO	CFC	8	0 (MSB)	Reserved.	-	-
				1	PLC Status (1 On / 0 Off).	UINT8	-
				2	Reserved.	-	-
				3	Command (Tabla 80).	UINT8	-
				4	Power setpoint (4 HB / 7 LB). 0.00...1200.00. W.	REAL	1
				5			
				6			
				7 (LSB)			

7.1.9 CAN/CANopen gateway 2 communication map

Tabla 105. Setting features of CAN/CANopen Gateway 2.

Communication Features	
Protocol	CANopen
ID Device	10
Baudrate	125 K

Tabla 106. CANopen object dictionary of CAN/CANopen Gateway 2 (part 1).

CAN/CANopen Gateway 2 CANopen Object Dictionary							
Com Object ID	Type	Equipment	Length (bytes)	Byte Number	Description	Type	Multiplier
0x18A	TPDO	FC	8	0 (MSB)	Stack voltage (0 HB / 1 LB). - 1000...5000. Volts x 100.	INT16	100
				1			
				2	Stack current (2 HB / 3 LB). 0...10000. Amps x 100.	INT16	100
				3			
				4	System current (4 HB / 5 LB). 0...10000. Amps x 100.	INT16	100
				5			
				6	Reserved	-	-
0x28A	TPDO	FC	8	7 (LSB)	Reserved	-	-
				0 (MSB)	Stack temperature (0 HB / 1 LB). -200...7500. °C x 100.	INT16	100
				1			
				2	Warning flags 1 (Tabla 83).	UINT8	-
				3	Warning flags 2 (Tabla 84).	UINT8	-
				4	H2 concentration (4 HB / 5 LB). 0...10000. ppm	INT16	1
				5			
0x38A	TPDO	FC	8	6	Reserved.	-	-
				7 (LSB)	Reserved.	-	-
				0 (MSB)	Reserved.	-	-
				1	System pressure (1 HB / 2 LB). -1000...7000. mbar x 10.	INT16	10
				2			
				3	System voltage (3 HB / 4 LB). - 1000...5000. Volts x 100.	INT16	100
				4			
0x48A	TPDO	FC	8	5	Ambient temperature (5 HB / 6 LB). -2000...10000. °C x 100.	INT16	100
				6			
				7 (LSB)	System state (Tabla 85).	UINT8	-
				0 (MSB)	Fan speed (0 HB / 1 LB). 0...5000. rpm.	UINT16	1
				1			
				2	Reserved.	-	-
				3	Reserved.	-	-
0x58A	TPDO	FC	8	4	Reserved.	-	-
				5	Information flags (Tabla 86).	UINT8.	-
				6	H2 inlet pressure. 0...2500. bar x 100.	INT16.	100
				7 (LSB)			
				0 (MSB)	Reserved.	-	-
				1	Reserved.	-	-
				2	Reserved.	-	-
				3	Error flags 1 (Tabla 87).	UINT8	-
				4	Error flags 2 (Tabla 88).	UINT8	-
				5	Error flags 3 (Tabla 89).	UINT8	-
				6	Error flags 4 (Tabla 90).	UINT8	-
				7 (LSB)	Reserved.	-	-

Tabla 107. CANopen object dictionary of CAN/CANopen Gateway 2 (part 2).

CAN/CANopen Gateway 2 CANopen Object Dictionary							
Com Object ID	Type	Equipment	Length (bytes)	Byte Number	Description	Type	Multiplier
0x68A	TPDO	Li	8	0 (MSB)	Lithium BMS response with Broadcaster v3.1 format.	-	-
				1		-	-
				2		-	-
				3		-	-
				4		-	-
				5		-	-
				6		-	-
				7 (LSB)		-	-
0x78A	TPDO	CPH	6	0 (MSB)	CPH reading info response with Xtender Serial format.	-	-
				1		-	-
				2		-	-
				3		-	-
				4		-	-
				5 (LSB)		-	-
0x79A	TPDO	CPH	7	0 (MSB)	CPH reading command response with Xtender Serial format.	-	-
				1		-	-
				2		-	-
				3		-	-
				4		-	-
				5		-	-
				6 (LSB)		-	-
0x7AA	TPDO	CPH	7	0 (MSB)	CPH writing command response with Xtender Serial format.	-	-
				1		-	-
				2		-	-
				3		-	-
				4		-	-
				5		-	-
				6 (LSB)		-	-
0x20A	RPDO	FC	2	0 (MSB)	Parameter code.	UINT8	-
				1 (LSB)	System command (Tabla 91).	UINT8	-
0x30A	RPDO	CPH	2	0 (MSB)	CPH reading info request with Xtender Serial format.	-	-
				1 (LSB)		-	-
0x40A	RPDO	CPH		0 (MSB)	CPH reading command request with Xtender Serial format.	-	-
				1		-	-
				2 (LSB)		-	-
0x50A	RPDO	CPH		0 (MSB)	CPH writing command request with Xtender Serial format.	-	-
				1		-	-
				2		-	-
				3		-	-
				4		-	-
				5		-	-
				6 (LSB)		-	-

7.1.10 Implementation of Modbus TCP/IP network

Both to have a header bibliography and to learn about Modbus TCP/IP protocol, the best references are the technical documentation provided by Modbus Organization (www.modbus.org). For installing and configuring of the Modbus TCP/IP network, the specification of the protocol [4] and its implementation guide over TCP/IP [5] were consulted.

The Modbus register map of the Acta Heliocentris ELS500 electrolyzer was extracted from the user's manual provided by the manufacturer [6].

The Modbus register map of the ESS3 DC/DC converter to the lithium battery stack was obtained from the technical documentation provided by the Power Electronics Group of [AICIA](#), which has designed and constructed this equipment for the Microgrid within the framework of the [CONFIGURA](#) project.

The online technical support provided by Schneider Electric has been used for configuring and programming of Modbus TCP/IP communication in the PLC Modicon M340, the device that implements the FLC. In particular, the Serial Link User Manual [8] of this PLC model has been consulted. Also, the following FAQs section entries [9] were consulted:

- [*A simple example of a READ VAR application for an M340 or M580 PLC.*](#)
- [*Ejemplo de mensajería Modbus/TCP con la plataforma M340.*](#)
- [*Using the DATA EXCH block to issue a function code 4 \(Read Input Register\) from a M340 Ethernet Interface.*](#)

7.1.11 Implementation of CAN and CANopen networks

To learn about CAN bus protocol there is a big amount of excellent formative documents written by electronic manufacturers [12] and engineering schools. However, the best reference is the specification of the protocol [10] [11], free available in 1991 version, that is enough for the present project.

A good reference for a basic knowledge about CANopen protocol is its page in the Wikipedia [14]. To go more deeply into different communication models, type of communication objects and the set of predefined profiles of CANopen protocol the *CAN in Automation* organization (www.can-cia.org), that commission the development of over layer protocols based in CAN, provide an extensive technical documentation. For the present project, the CANopen application layer and communication profile implementation [15] was consulted.

For configuring and wiring of CAN bus interface of the NEXA 1200 hydrogen fuel cell, as well as for a knowledge of the register packaging in its set of CAN frames, it was consulted the technical documentation provided by the manufacturer [18].

The BMS to the lithium battery stack has a CAN interface with a fixed configuration. It has a baudrate of 500 kBauds and its own internal terminating resistor. It is because of that this device is connected to the end of the CAN bus to the CAN/CANopen Gateway 2, and its transmission speed define the transmission speed of the rest of devices connected to the bus. It has a single CAN 2.0A frame, only for reading, through which it periodically sends measurement values and flag registers according to the proprietary protocol Broadcaster V3.1 [22] of Elite Power.

The Studer VarioString VS-70 DC/DC converter to the photovoltaic field is controlled by the RCC-02 programming and remote control module [24], also manufactured by Studer. The RCC-02 module communicates with a proprietary serial protocol called Xtender [25]. By means of an Xcom-CAN gateway [26], the RCC-02 module can communicate to the CAN network of the Microgrid. The Xcom-CAN gateway provides a set of CAN 2.0B frames to encapsulate the Xtender protocol [27].

For installing and configuring of the ADFWeb CAN/CANopen gateways, it was consulted the technical documentation provided by the manufacturer [16] [17]. There is an specific software, also provided by the manufacturer, to program the CAN frames for receiving and transmission, and their respective associated CANopen communication objects.

Finally, for configuring of CANopen communication in the Modicon M340 PLC, it was newly consulted the technical online support provided by Schneider Electric [28].

7.2 ANEXO 2: Interfaz de usuario del FLC

7.2.1 Introducción. Requisitos *hardware* y *software*. Objetivos y alcance del Anexo.

El *First Level Controller* dispone de una interfaz de usuario propia, que ha sido desarrollada e incluida dentro del mismo proyecto Unity Pro en el que se ha implementado la programación del dispositivo.

Esta interfaz ha sido ideada con el propósito de ofrecer un HMI básico para la monitorización y control de la Microrred en sus distintos modos de operación, así como para disponer de una herramienta para el testeo y depuración de la programación del *First Level Controller* y de los algoritmos de control del *Second Level Controller*.

El único requisito *software* para poder utilizar la interfaz de usuario del FLC es disponer del entorno de desarrollo Unity Pro V11.0 o posterior instalado en la *workstation*. Los requisitos *hardware*, de sistema operativo y de máquinas virtuales serán los necesarios para la instalación de Unity Pro V11.0 [32].

La interfaz de usuario del FLC contiene las funcionalidades mínimas necesarias teniendo en cuenta los propósitos para los que se ha desarrollado. Implementa la monitorización de magnitudes, estados, warnings y errores de todos los dispositivos y sistemas de la Microrred. También, implementa el envío de órdenes de arranque, parada y rearme para todos los equipos, así como envío de setpoints, y también el comando de las válvulas de los circuitos de hidrógeno y refrigeración/calefacción para los tanques de hidruros. El aspecto visual del conjunto de HMIs que forman la interfaz también es muy simple, teniendo en cuenta los limitados recursos que ofrece Unity Pro para la implementación de pantallas de explotación. En cualquier caso, para su diseño se han tenido en cuenta las directrices que se indican en [29] [30] y [31] sobre el diseño de HMIs para SCADAs.

En un futuro próximo, se ha planificado el desarrollo de un SCADA más completo mediante el entorno Vijeo Citect, que dispondrá de una base de datos históricos para la generación de curvas y tablas de eventos, conexión a internet para monitorización remota, y mejores recursos para el diseño de HMIs más amigables.

El objetivo del presente anexo es proporcionar una descripción completa de la arquitectura de la interfaz de usuario del FLC y del conjunto de elementos indicadores y de control contenidos en cada una de las pantallas que la forman para la implementación de las distintas funcionalidades que contienen.

7.2.2 Arquitectura de la interfaz de usuario del FLC

La interfaz de usuario del FLC está compuesta por 12 pantallas en total. Son las que se enumeran a continuación:

- **Pantalla para Selección Modos de Operación.** Contiene un diagrama con los modos de operación de la Microgrid, mediante el cual el usuario puede visualizar el modo de operación activo, realizar el arranque o la parada de la instalación, seleccionar entre los diferentes modos de funcionamiento, o realizar un rearme tras una parada de emergencia.
- **Pantalla Vista General.** Esta pantalla contiene un sinóptico general de la Microrred, que ofrece una visión de conjunto del estado de funcionamiento de todos sus equipos y del balance de potencias entre ellos.
- **Panel Gestión DC/DC Photovoltaico.** Este panel contiene el conjunto de funcionalidades de la interfaz relativas al convertidor DC/DC asociado al campo fotovoltaico.
- **Panel Gestión Lead Battery Stack.** Este panel contiene el conjunto de funcionalidades de la interfaz relativas al stack de baterías de plomo.
- **Panel Gestión Lithium Battery Stack.** Este panel contiene el conjunto de funcionalidades de la interfaz relativas al stack de baterías de litio.
- **Panel Gestión DC/DC Baterías de Litio.** Este panel contiene el conjunto de funcionalidades de la interfaz relativas al DC/DC asociado al stack de baterías de litio.
- **Panel Gestión Electrolizador.** Este panel contiene el conjunto de funcionalidades de la interfaz relativas al electrolizador.
- **Panel Gestión H2 Fuel Cell.** Este panel contiene el conjunto de funcionalidades de la interfaz relativas a la pila de hidrógeno.
- **Panel Gestión DC/DC H2 Fuel Cell.** Este panel contiene el conjunto de funcionalidades de la interfaz relativas al DC/DC asociado a la pila de hidrógeno.
- **Panel Gestión Fuente de Alimentación Programable.** Este panel contiene el conjunto de funcionalidades de la interfaz relativas a la fuente programable.
- **Panel Gestión Carga Programable.** Este panel contiene el conjunto de funcionalidades de la interfaz relativas a la carga programable.
- **Panel Gestión Circuitos de H2 y de Agua.** Este panel contiene el conjunto de funcionalidades de la interfaz relativas al circuito de hidrógeno y al circuito de agua para la calefacción y refrigeración de los tanques de hidruros.

El acceso a las diferentes pantallas de la interfaz se realiza sólo a través de la ventana explorador de proyectos de Unity (Figura 108). No se dispone de elementos de navegación como menús desplegables o barras de iconos para ello.

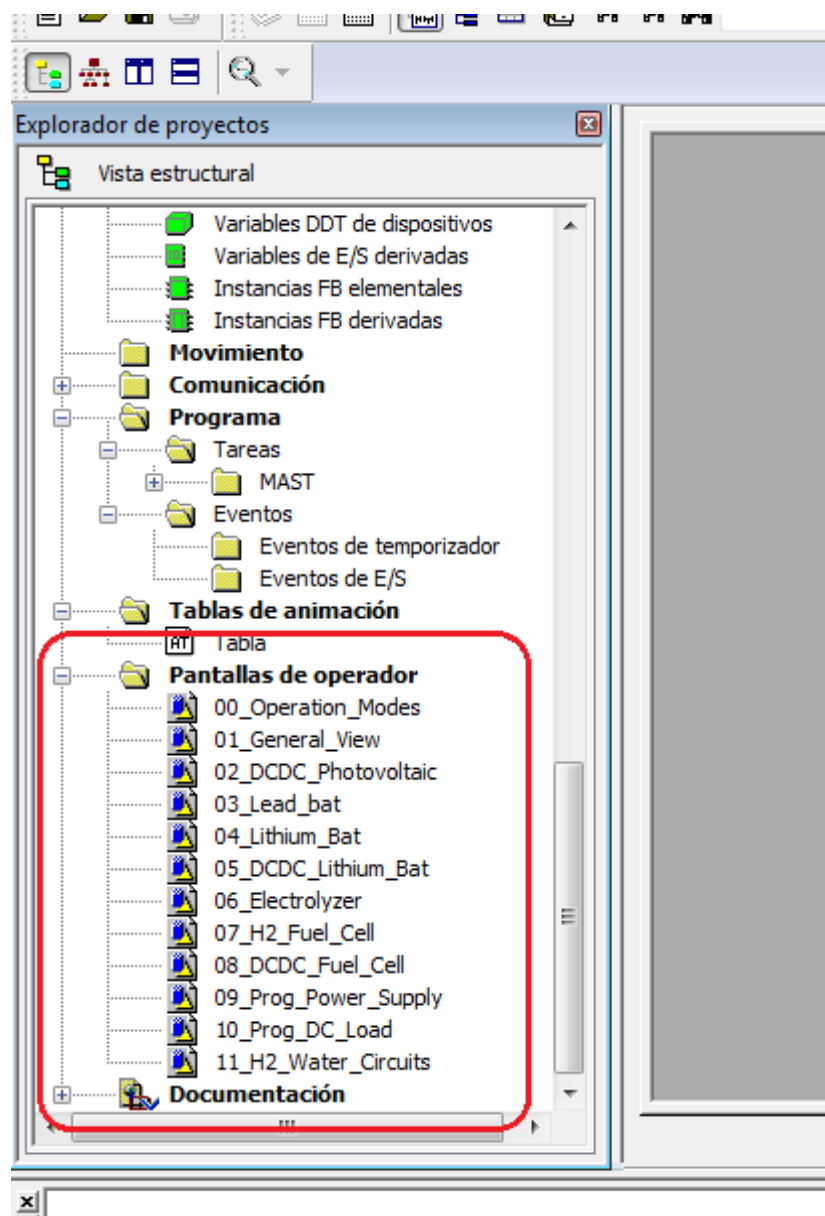


Figura 108. Acceso a las pantallas de la interfaz de usuario del FLC.

7.2.3 Pantalla para Selección de Modos de Operación

La pantalla para la selección de modos de operación dispone de un diagrama que representa a la máquina de estados mediante la cual se controlan las transiciones entre los diferentes modos de operación que se han definido para la microrred. A través de ella puede monitorizarse el modo de operación activo, realizar el arranque y la parada de la microrred, seleccionar entre los modos de funcionamiento manual y remoto, así como realizar el rearme de la instalación desde el estado de emergencia. Su apariencia es la que se muestra en la Figura 109.

Las funcionalidades que proporciona la pantalla para la selección de modos de operación son las siguientes:

- **Monitorización del modo de operación activo (Figura 110).**
- **Arranque de la Microrred.** Se realiza desde el estado *A1 Stop* mediante el pulsador *Start* (Figura 111). Cuando se ordena el arranque, el programa del *First Level Controller* ejecuta la secuencia *F2 Starting Process*, en la cual se realiza la inertización de la red de hidrógeno, se solicita al usuario el encendido de la fuente y de la carga programables (Figura 112 y Figura 113), y se verifica que todos los equipos de la Microrred se encuentren operativos. Una vez finaliza la secuencia de puesta en marcha, la Microrred alcanza el estado *F1.0 Standby*, y permanece en él indefinidamente hasta que el usuario seleccione entre los modos *F1.1 Remote* ó *F1.2 Manual*. Un tiempo de arranque superior a 90 segundos se considera condición de error.
- **Selección del Modo de Funcionamiento Manual.** Se realiza desde el estado *F1.0 Standby*, mediante el pulsador *Manual Func Sel* (Figura 114). Este modo de funcionamiento habilita el comando y envío de consignas a cualquier dispositivo de la microrred de forma manual desde el HMI de la *Workstation*.
- **Selección del Modo de Funcionamiento Remoto.** Se realiza desde el estado *F1.0 Standby*, mediante el pulsador *Manual Func Sel* (Figura 115). Este modo de funcionamiento es el que habilita el comando y envío de consignas a los dispositivos de la microrred desde el *Second Level Controller*.
- **Parada de la Microrred.** Puede solicitarse desde los modos de operación *F1.1 Remote* y *F1.2 Manual*, o desde el estado *F1.0 Standby*, mediante el pulsador *Stop* (Figura 116). Cuando se solicita una parada, el programa del *First Level Controller* ejecuta la secuencia *F3 Stop*, en la cual se ponen a cero las consignas de todos los equipos y se les envían órdenes de apagado. Una vez finaliza la secuencia de parada, la Microrred alcanza el estado inicial *A0 Stop*, y permanece en él indefinidamente hasta que el usuario ordene un nuevo arranque de la planta. Un tiempo de parada superior a 90 segundos se considera condición de error.
- **Error acknowledgement.** Cuando se da una condición de error, el *First Level Controller* ejecuta primero la secuencia *D1.0 Emergency Stop Sequence*, en la cual se realiza un proceso de parada de la planta igual al de la secuencia *F3 Stop*. Cuando finaliza la secuencia de puesta en estado de emergencia, o cuando su ejecución supera un tiempo superior a 90 segundos, la Microrred alcanza el estado *D1.1 Emergency State*, en el cual todas los comandos hacia los dispositivos permanecen en apagado, todas las consignas a cero, y todas las órdenes para válvulas en cierre. Entonces, el usuario puede pulsar el botón *Error Ack* (Figura 117), para reconocer el estado de emergencia, y entonces la Microrred alcanza el estado *D1.2 Diagnosis*, que implementa un modo de operación manual dentro del estado de emergencia que permite ejecutar acciones en desorden para llevar a la Microrred a un estado seguro y rearmar los equipos.

OPERATION MODES SELECTION

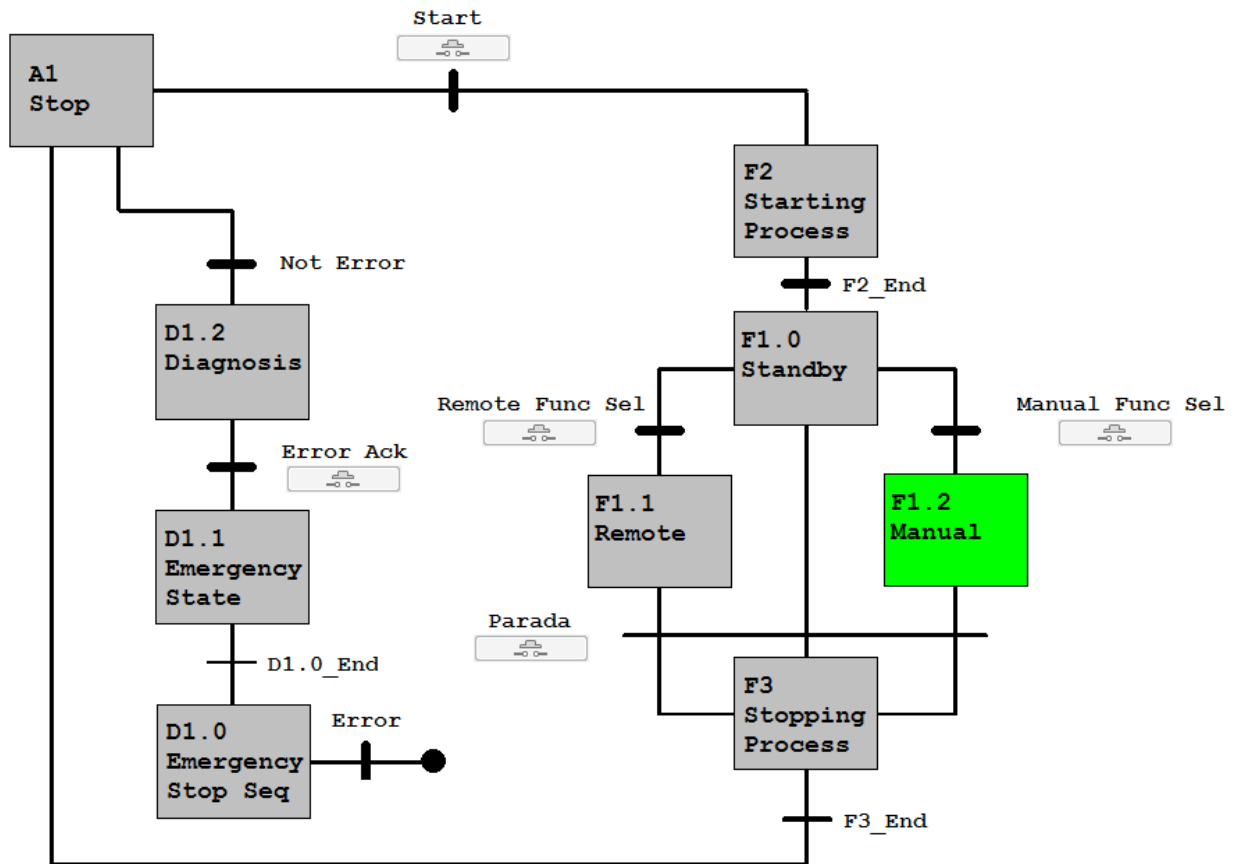


Figura 109. Pantalla para Selección de Modos de Operación.

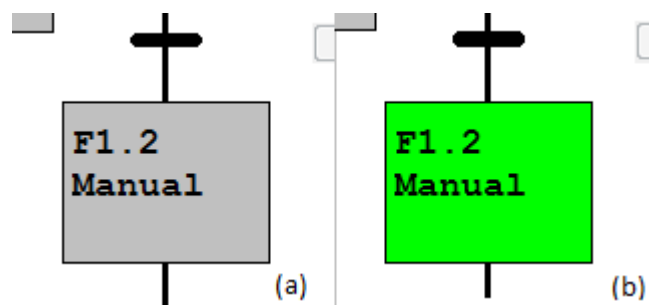


Figura 110. Modo de operación inactivo (a) y activo (b).

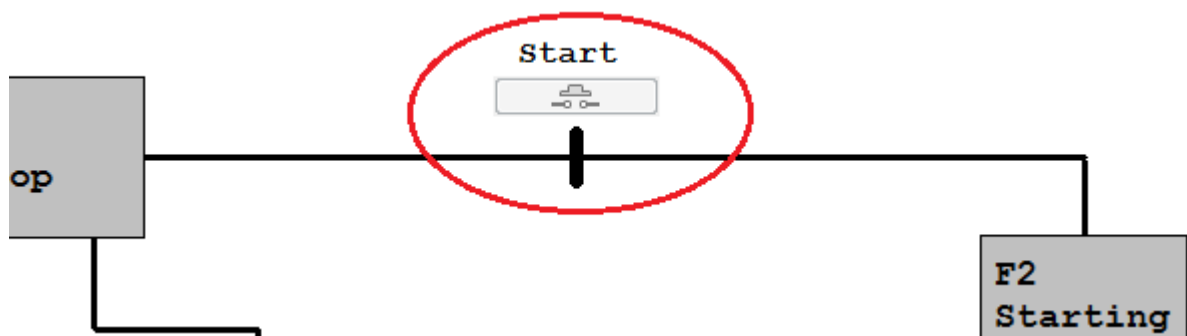


Figura 111. Botón *Start* para orden de arranque de la Microrred.

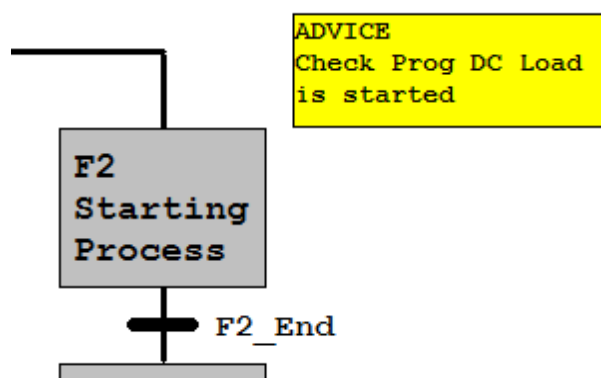


Figura 112. Solicitud de encendido para la carga programable.

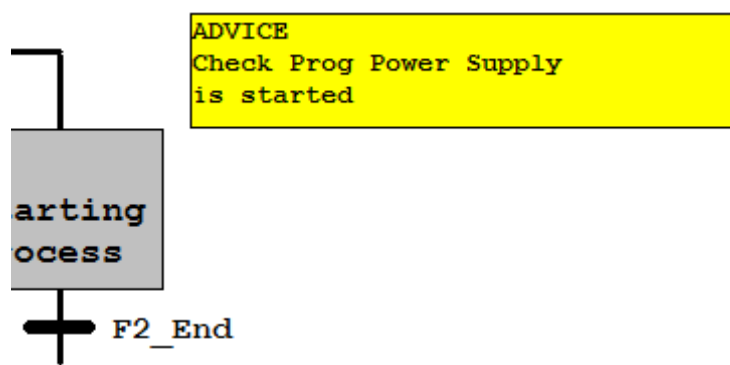


Figura 113. Solicitud de encendido para la fuente programable.

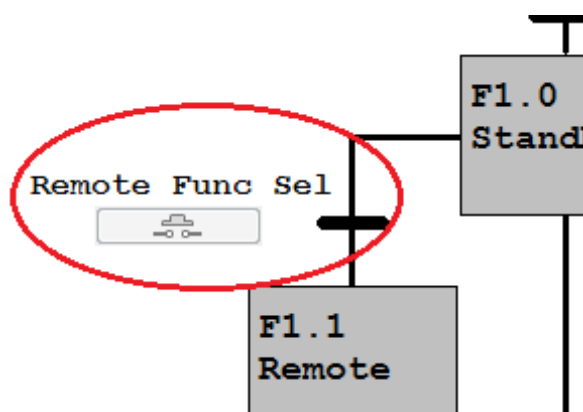


Figura 114. Botón *Remote Func Sel* para la selección del modo de funcionamiento remoto.

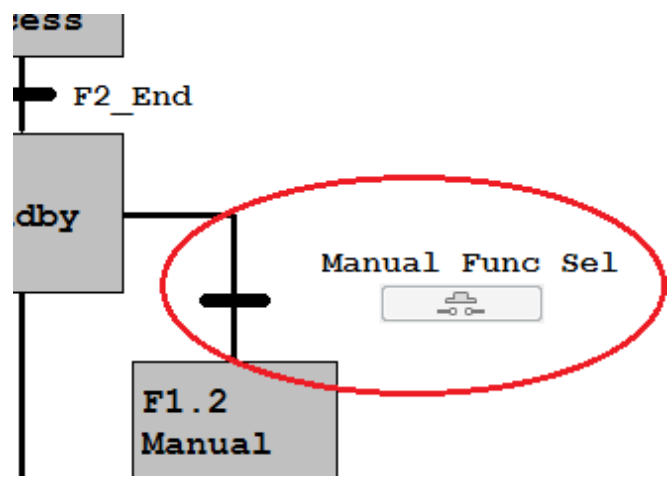


Figura 115. Botón *Manual Func Sel* para la selección del modo de funcionamiento manual.

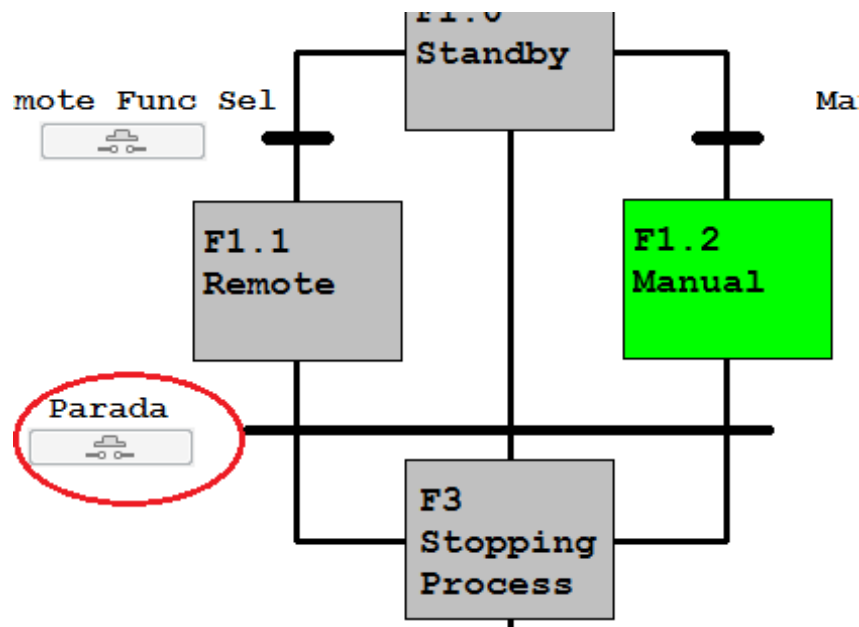


Figura 116. Botón *Parada* para la solicitud de parada de la planta.

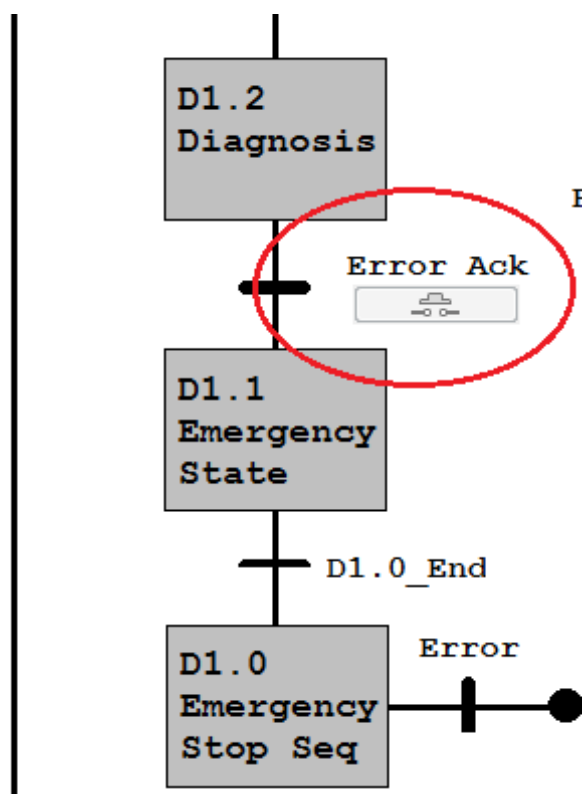


Figura 117. Botón *Error Ack* para reconocimiento de errores.

7.2.4 Pantalla General View

La pantalla *General View* contiene un sinóptico de la Microrred, que ofrece una visión de conjunto del estado de funcionamiento de todos los equipos y sistemas que la integran, el balance de los flujos de potencia en el bus principal y los estados de carga de los diferentes vectores para almacenamiento de energía. Dispone también de controles para habilitar o deshabilitar equipos y condiciones de error. Su apariencia es la que se muestra en la Figura 118.

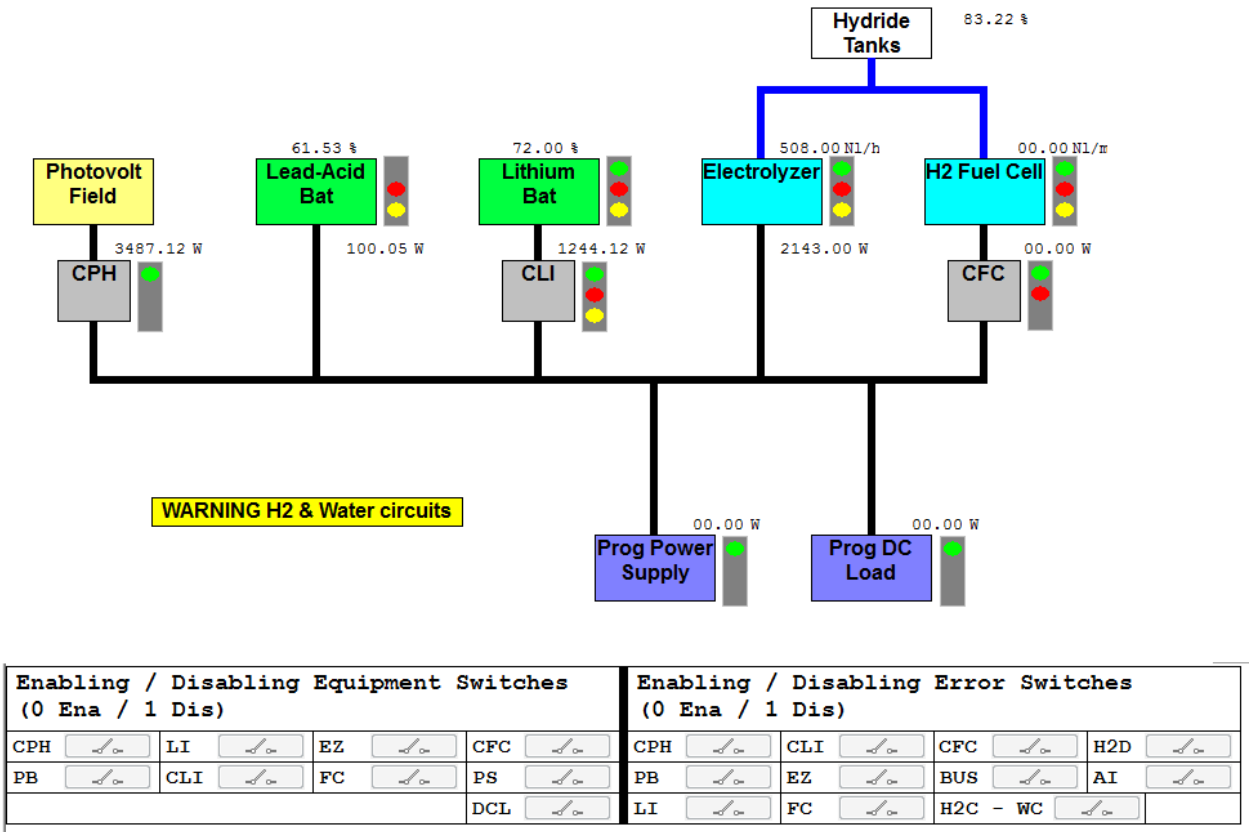


Figura 118. Pantalla General View.

Las funcionalidades que proporciona la pantalla *General View* son las siguientes:

- **Monitorización del estado de funcionamiento de cada equipo (Figura 119).**
- **Monitorización de potencias inyectadas o tomadas del bus principal de la Microrred (Figura 120).**
- **Monitorización de los estados de carga del stack de baterías de plomo, del stack de baterías de litio, y de los tanques de hidruros (Figura 121).**
- **Monitorización de indicaciones de error y aviso de los circuitos de agua y de hidrógeno y de actuación sobre la seta de emergencia (Figura 122).**
- **Habilitación y deshabilitación de equipos (Figura 123).** Cuando se deshabilita un equipo de la Microrred, la secuencia de arranque *F2 Starting Process* no será interrumpida en caso de que dicho equipo no esté operativo. La nomenclatura empleada para designar estos controles es la siguiente:
 - CPH: convertidor DC/DC asociado al campo fotovoltaico.

- PB: stack de baterías de plomo.
- LI: stack de baterías de litio.
- CLI: convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio.
- EZ: electrolizador.
- FC: pila de hidrógeno.
- CFC: convertidor DC/DC asociado a la pila de hidrógeno.
- PS: fuente de alimentación programable.
- DCL: carga DC programable.
- **Habilitación y deshabilitación de condiciones de error (Figura 124).** La nomenclatura empleada para designar estos controles es la siguiente:
 - CPH: condiciones de error asociadas al convertidor DC/DC asociado al campo fotovoltaico.
 - PB: condiciones de error asociadas al stack de baterías de plomo.
 - LI: condiciones de error asociadas al stack de baterías de litio.
 - CLI: condiciones de error asociadas al convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio.
 - EZ: condiciones de error asociadas al electrolizador.
 - FC: condiciones de error asociadas al pila de hidrógeno.
 - CFC: c condiciones de error asociadas al convertidor DC/DC asociado a la pila de hidrógeno.
 - PS: condiciones de error asociadas al fuente de alimentación programable.
 - DCL: condiciones de error asociadas al carga DC programable.
 - BUS: condiciones de error asociadas al bus principal de la Microrred.
 - H2C - WC: condiciones de error asociadas a los circuitos de hidrógeno y de agua.
 - AI: condiciones de error asociadas a las entradas analógicas del PLC.
 - H2D: condiciones de error asociadas a la descarga de hidrógeno de los tanques de hidruros.

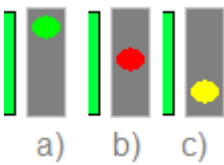


Figura 119. Indicador para la monitorización del estado de funcionamiento de un equipo. *a)* Marcha. *b)* Error. *c)* Warning.

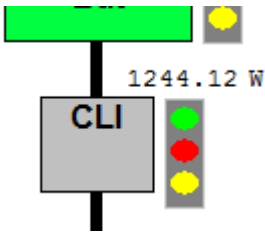


Figura 120. Indicador para la monitorización de la potencia cedida o entregada al bus principal por el convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (CLI).

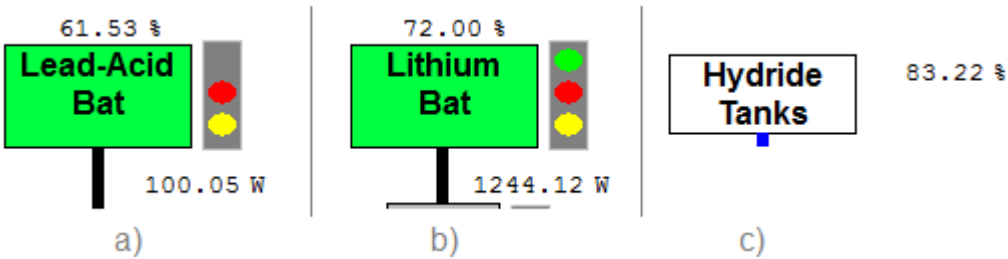


Figura 121. Indicadores para los estados de carga del stack de baterías de plomo (*a*), del stack de baterías de litio (*b*) y de los tanques de hidruros (*c*).

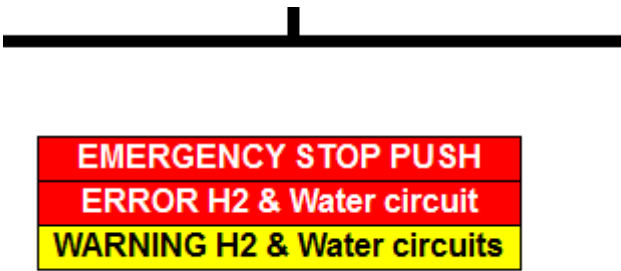


Figura 122. Indicadores para errores y avisos en los circuitos de hidrógeno y de agua y para actuaciones sobre la seta de emergencia.







Enabling / Disabling Equipment Switches (0 Ena / 1 Dis)			
CPH		LI	
PB		CLI	
		FC	
			DCL 

Figura 123. Controles para la habilitación y deshabilitación de equipos.








Enabling / Disabling Error Switches (0 Ena / 1 Dis)			
CPH		CLI	
PB		EZ	
LI		FC	
		H2C - WC	

Figura 124. Controles para la habilitación y deshabilitación de condiciones de error.

7.2.5 Panel Gestión DC/DC Fotovoltaico

A través de esta pantalla, el usuario tiene acceso a todas las funcionalidades relativas al manejo del convertidor DC/DC Studer VarioString 70 para el campo fotovoltaico, designado CPH (*Converter - PHotovoltaic*). Su apariencia es la que se muestra en la Figura 125.

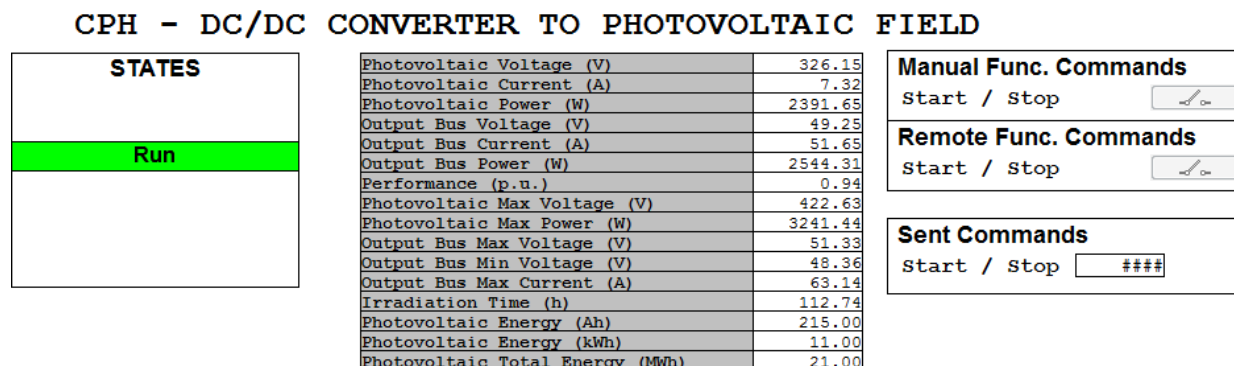


Figura 125. Pantalla para la gestión del convertidor DC/DC asociado al campo fotovoltaico.

Dichas funcionalidades son las siguientes:

- **Monitorización del estado del convertidor.** Mediante los indicadores situados a la izquierda de la pantalla, dentro del recuadro *States*, pueden monitorizarse los dos estados del convertidor, que son *Standby* y *Run* (Figura 126).
- **Monitorización de las magnitudes del convertidor.** Mediante los indicadores situados en la zona central de la pantalla (Figura 127), pueden monitorizarse las siguientes magnitudes:
 - **Photovoltaic Voltage (V).** Tensión a la entrada del convertidor, proveniente del campo de paneles fotovoltaicos.
 - **Photovoltaic Current (A).** Intensidad a la entrada del convertidor, proveniente del campo de paneles fotovoltaicos.
 - **Photovoltaic Power (W).** Potencia a la entrada del convertidor, proveniente del campo de paneles fotovoltaicos.
 - **Output Bus Voltage (V).** Tensión a la salida del convertidor, hacia el bus principal.
 - **Output Bus Current (A).** Intensidad a la salida del convertidor, hacia el bus principal.
 - **Output Bus Power (W).** Potencia a la salida del convertidor, vertida en el bus principal.
 - **Performance (p.u.).** Rendimiento del convertidor, calculado como el cociente de la potencia de salida entre la potencia de entrada del convertidor, expresado en tanto por uno.
 - **Photovoltaic Max Voltage (V).** Máximo valor de la tensión a la entrada del convertidor, durante todo el tiempo que ha estado en modo *Run* produciendo potencia a su salida.
 - **Photovoltaic Max Power (W).** Máximo valor de la potencia a la entrada del convertidor, durante todo el tiempo que ha estado en modo *Run* produciendo potencia a su salida.
 - **Output Bus Max Voltage (V).** Máximo valor de la tensión a la salida del convertidor, durante todo el tiempo que ha estado en modo *Run* produciendo potencia a su salida.
 - **Output Bus Min Voltage (V).** Mínimo valor de la tensión a la salida del convertidor, durante todo el tiempo que ha estado en modo *Run* produciendo potencia a su salida.
 - **Output Bus Max Current (A).** Máximo valor de la intensidad a la salida del convertidor, durante todo el tiempo que ha estado en modo *Run* produciendo potencia a su salida.
 - **Irradiation Time (h).** Tiempo total de irradiación sobre el campo de paneles fotovoltaicos, calculado por el *Front End Controller* del convertidor como el tiempo en el que ha estado recibiendo potencia a su entrada desde que está en modo *Run*, expresado en horas.

- **Photovoltaic Energy (Ah).** Energía total que el convertidor ha recibido a su entrada desde el campo de paneles fotovoltaicos, durante todo el tiempo que ha estado en modo *Run*, expresada en amperios hora.
- **Photovoltaic Energy (kWh).** Energía total que el convertidor ha recibido a su entrada desde el campo de paneles fotovoltaicos, durante todo el tiempo que ha estado en modo *Run*, expresada en kilovatios hora.
- **Photovoltaic Total Energy (MWh).** Energía total que el convertidor ha recibido a su entrada desde el campo de paneles fotovoltaicos, desde que salió de fábrica, expresada en megavatios hora.
- **Envío de comandos al convertidor en el Modo de Funcionamiento Manual.** Mediante el control situado a la derecha de la pantalla (Figura 128), en el recuadro *Manual Func. Commands*, pueden enviarse al convertidor órdenes de arranque y de parada. Este control sólo está habilitado cuando la Microrred se encuentra en el Modo de Funcionamiento Manual, o en el modo D1.2 Diagnosis. Para el resto de modos estará deshabilitado.
- **Envío de comandos al convertidor en el Modo de Funcionamiento Remoto.** De manera análoga al envío de comandos en el Modo de Funcionamiento Manual, mediante el control situado a la derecha de la pantalla (Figura 129), en el recuadro *Remote Func. Commands*, pueden enviarse al convertidor órdenes de arranque y de parada en el Modo de Funcionamiento Remoto. Se ha incluido este control en la Interfaz de Usuario del FLC para testear el correcto comando del convertidor Studer VarioString 70 cuando la Microrred se encuentra en el Modo de Funcionamiento Remoto, estando sólo habilitado dicho control en este modo.
- **Monitorización de comandos enviados al convertidor.** Mediante el indicador situado a la derecha de la pantalla (Figura 130), en el recuadro *Sent Commands*, pueden monitorizarse las órdenes de arranque y de parada enviadas al convertidor en cualquiera de los modos de operación de la Microrred. Se ha incluido este elemento en la Interfaz de Usuario del FLC para verificar que los comandos enviados al convertidor Studer VarioString 70 son correctos, tanto con propósitos de depuración del programa que implementa *First Level Controller* como para la depuración de los algoritmos del *Second Level Controller*.

No es posible enviar consignas de potencia al CPH. En lugar de ello, lleva incluido en su *Front End Controller* un algoritmo MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) que le permite generar a su salida siempre la máxima potencia que pueda obtenerse del campo de paneles fotovoltaicos.

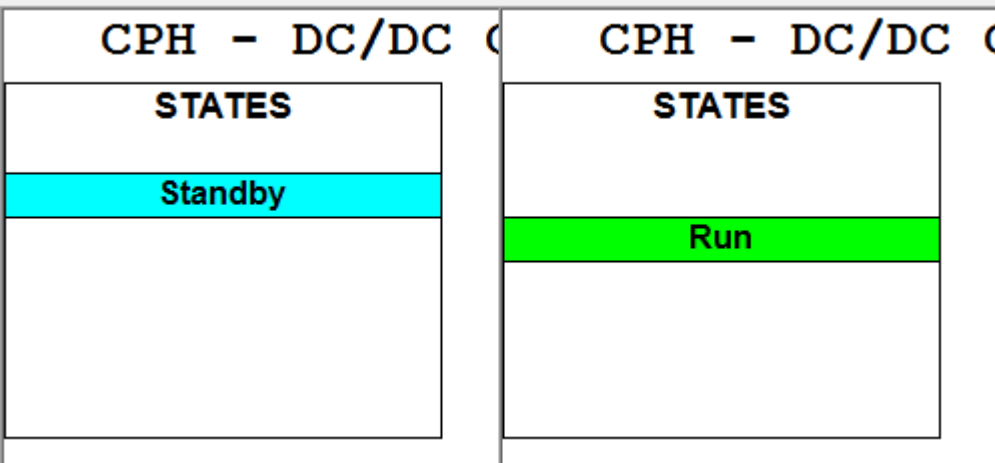


Figura 126. Indicadores para la monitorización del estado del convertidor DC/DC asociado al campo fotovoltaico (CPH).

CONVERTER TO PHOTOVOLTAIC	
Photovoltaic Voltage (V)	326.15
Photovoltaic Current (A)	7.32
Photovoltaic Power (W)	2391.65
Output Bus Voltage (V)	49.25
Output Bus Current (A)	51.65
Output Bus Power (W)	2544.31
Performance (p.u.)	0.94
Photovoltaic Max Voltage (V)	422.63
Photovoltaic Max Power (W)	3241.44
Output Bus Max Voltage (V)	51.33
Output Bus Min Voltage (V)	48.36
Output Bus Max Current (A)	63.14
Irradiation Time (h)	112.74
Photovoltaic Energy (Ah)	215.00
Photovoltaic Energy (kWh)	11.00
Photovoltaic Total Energy (MWh)	21.00

Figura 127. Indicadores para la monitorización de las magnitudes del convertidor DC/DC asociado al campo fotovoltaico (CPH).



Figura 128. Control para el envío de comandos al CPH en el Modo de Funcionamiento Manual y en el modo D1.2 Diagnosis.

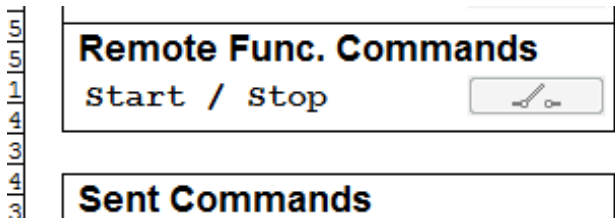


Figura 129. Control para el envío de comandos al CPH en el Modo de Funcionamiento Remoto.

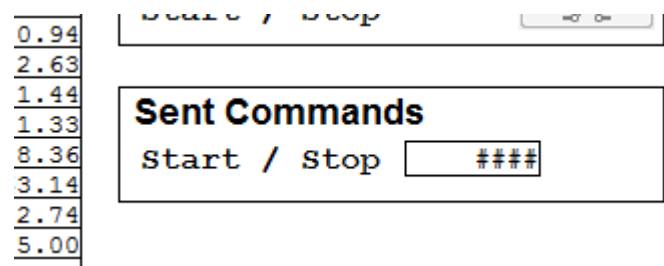


Figura 130. Indicador para la monitorización de los comandos enviados al CPH.

7.2.6 Panel Gestión Lead Battery Stack

A través de esta pantalla, el usuario tiene acceso a todas las funcionalidades relativas al manejo del stack de baterías de plomo, designado PB (símbolo químico del plomo). Su apariencia es la que se muestra en la Figura 131.

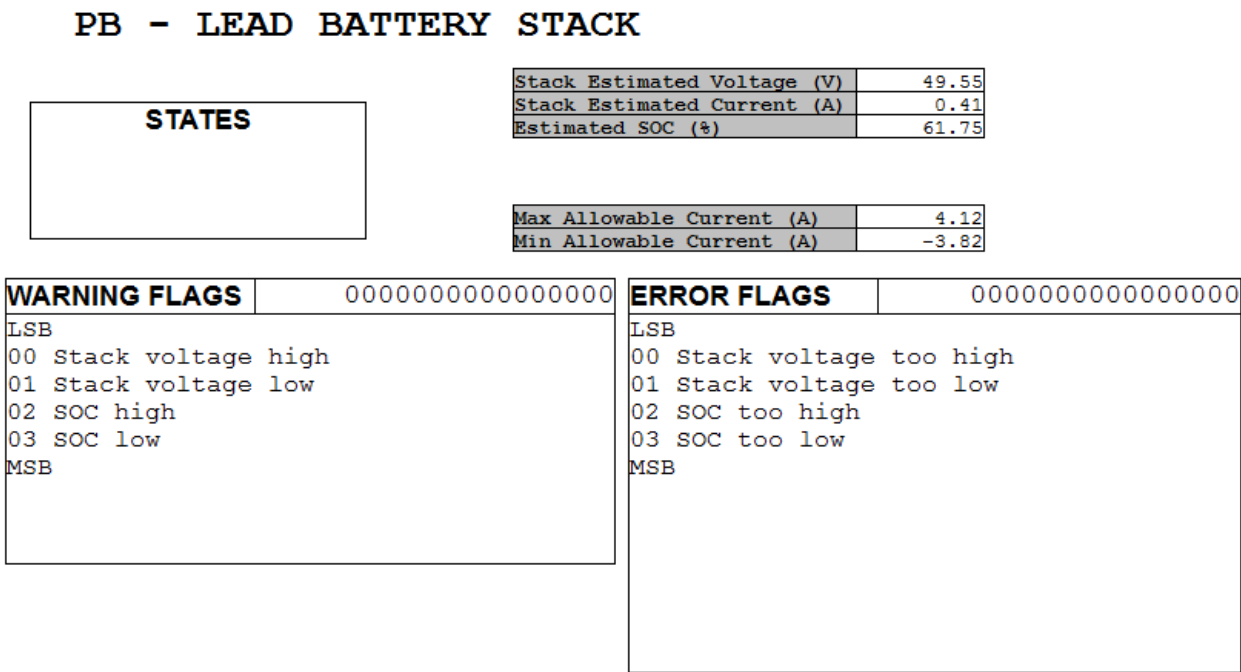


Figura 131. Pantalla para la gestión del stack de baterías de plomo (PB).

Dichas funcionalidades son las siguientes:

- **Monitorización de los estados de Error y Warning del stack.** Mediante los indicadores situados a la izquierda de la pantalla (Figura 132), pueden monitorizarse los estados de *Error* y de *Warning* asociados al stack, que se activan cuando alguno de los correspondientes flags de error y de aviso se pone a 1.
- **Monitorización de las magnitudes del stack.** Mediante los indicadores situados en la zona central superior de la pantalla (Figura 133), pueden monitorizarse las siguientes magnitudes:
 - *Stack Estimated Voltage (V)*. Tensión en el stack, estimada como igual a la tensión en el bus principal.
 - *Stack Estimated Current (A)*. Intensidad en el stack, estimada a partir del balance de intensidades en el resto de equipos de la Microrred que vierten o extraen potencia del bus principal.
 - *Estimated SOC (%)*. Estado de carga del stack. Su estimación se obtiene a partir de la estimación de la tensión en vacío del stack, medida cuando se pone en marcha el *First Level Control*, y la integral de la estimación de la intensidad que entra o sale del stack.
 - *Max Allowable Current (A)*. Máxima intensidad permisible en el stack PB, calculada como el cociente entre su límite máximo de tensión y la estimación de su resistencia interna.
 - *Min Allowable Current (A)*. Mínima intensidad permisible en el stack PB, calculada como el cociente entre su límite mínimo de tensión y la estimación de su resistencia interna.
- **Monitorización de los flags de aviso del stack.** Existen unos límites máximos y mínimos para la tensión y el estado de carga del stack. Cuando se superan, debe proporcionarse un aviso al usuario sin interrumpir el funcionamiento de la Microrred. El conjunto de flags situados en la parte inferior izquierda de la pantalla (Figura 134), dentro del recuadro *Warning Flags*, permiten monitorizar al usuario la activación de un conjunto de flags con los cuales se indican la superación de dichos límites.

Sus valores por defecto son los que se indican en la Tabla 108.

Tabla 108. Límites de *warning* máximos y mínimos de tensión y estado de carga del stack de baterías de plomo (PB).

Warning Limits of Lead Battery Stack	
Stack voltage high limit (V)	52.0
Stack voltage low limit (V)	46.0
SOC high limit (%)	70.0
SOC low limit (%)	40.0

- **Monitorización de los flags de error del stack.** Existen unos límites operacionales máximos y mínimos para la tensión y el estado de carga del stack que al superarse pueden provocar daños irreversibles al stack. Si se superan, la Microrred debe entrar en el estado de emergencia y proporcionar una indicación al usuario. El conjunto de flags situados en la parte inferior derecha de la pantalla (Figura 135), dentro del recuadro *Error Flags*, permiten monitorizar al usuario la activación de un conjunto de flags con los cuales se indican la superación de dichos límites. Sus valores por defecto son los que se indican en la Tabla 109.

Tabla 109. Límites de error máximos y mínimos de tensión y estado de carga del stack de baterías de plomo (PB).

Error Limits of Lead Battery Stack	
Stack voltage high limit (V)	56.0
Stack voltage low limit (V)	44.0
SOC high limit (%)	80.0
SOC low limit (%)	30.0

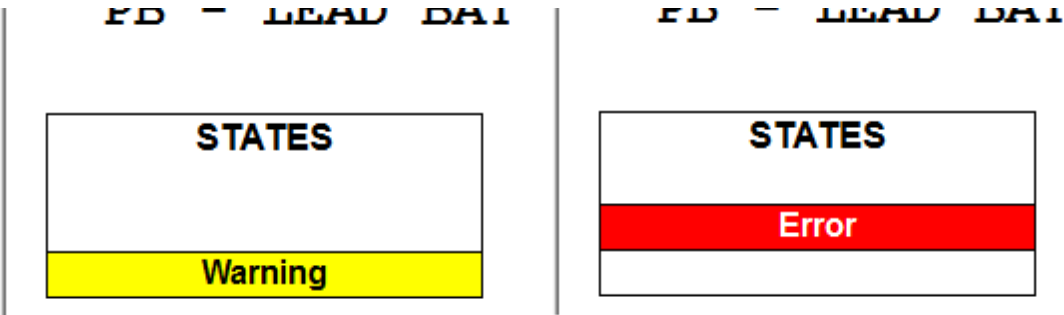


Figura 132. Indicadores para los estados de *warning* y *error* del stack de baterías de plomo (PB).

1 STACK

Stack Estimated Voltage (V)	49.55
Stack Estimated Current (A)	0.41
Estimated SOC (%)	61.75

Max Allowable Current (A)	4.12
Min Allowable Current (A)	-3.82

Figura 133. Indicadores para la monitorización de las magnitudes del stack de baterías de plomo (PB).

WARNING FLAGS	0000000000000000	E
LSB		I
00 Stack voltage high		0
01 Stack voltage low		0
02 SOC high		0
03 SOC low		0
MSB		M

Figura 134. Indicador para los flags de aviso del stack de baterías de plomo (PB).

ERROR FLAGS	0000000000000000
LSB	
00 Stack voltage too high	
01 Stack voltage too low	
02 SOC too high	
03 SOC too low	
MSB	

Figura 135. Indicador para los flags de error del stack de baterías de plomo (PB).

7.2.7 Panel Gestión Lithium Battery Stack

Mediante esta pantalla, el usuario tiene acceso a todas las funcionalidades relativas al manejo del stack de baterías de litio a través de su *Energy Management System* de Elite Power Solutions, designado LI (símbolo químico del litio). Su apariencia es la que se muestra en la Figura 136.

LI - LITHIUM BATTERY STACK			
STATES			
Normal Operation			
Lithium Battery Stack Voltage (V)	61.12	Cell 1 Voltage (V)	3.82
Lithium Battery Stack Current (A)	0.01	Cell 2 Voltage (V)	3.82
Lithium Battery State of Charge (%)	72.00	Cell 3 Voltage (V)	3.82
Lithium Battery average cell voltage (V)	3.82	Cell 4 Voltage (V)	3.82
Lithium Battery highest cell voltage (V)	3.82	Cell 5 Voltage (V)	3.82
Lithium Battery lowest cell voltage (V)	3.82	Cell 6 Voltage (V)	3.82
Lithium Battery average cell temperature (°C)	22.00	Cell 7 Voltage (V)	3.82
Lithium Battery highest cell temperature (°C)	22.00	Cell 8 Voltage (V)	3.82
		Cell 9 Voltage (V)	3.82
		Cell 10 Voltage (V)	3.82
		Cell 11 Voltage (V)	3.82
		Cell 12 Voltage (V)	3.82
		Cell 13 Voltage (V)	3.82
		Cell 14 Voltage (V)	3.82
		Cell 15 Voltage (V)	3.82
		Cell 16 Voltage (V)	3.82
		Cell 1 Temperature (°C)	22.00
		Cell 2 Temperature (°C)	22.00
		Cell 3 Temperature (°C)	22.00
		Cell 4 Temperature (°C)	22.00
		Cell 5 Temperature (°C)	22.00
		Cell 6 Temperature (°C)	22.00
		Cell 7 Temperature (°C)	22.00
		Cell 8 Temperature (°C)	22.00
		Cell 9 Temperature (°C)	22.00
		Cell 10 Temperature (°C)	22.00
		Cell 11 Temperature (°C)	22.00
		Cell 12 Temperature (°C)	22.00
		Cell 13 Temperature (°C)	22.00
		Cell 14 Temperature (°C)	22.00
		Cell 15 Temperature (°C)	22.00
		Cell 16 Temperature (°C)	22.00
WARNING FLAGS	0000000000000000	ERROR FLAGS	0000000000000000
LSB		LSB	
00 Stack voltage high		00 Pack to chassis detected	
01 Stack voltage low		01 Pack to cell communication error	
02 Stack current high		02 System error	
03 Cell voltage high		03 Cell temp too high	
04 Cell voltage low		04 Stack voltage too high	
05 SOC high		05 Stack voltage too low	
06 SOC low		06 Stack current too high	
MSB		07 Cell voltage too high	
		08 Cell voltage too low	
		09 SOC too high	
		10 SOC too low	
		MSB	

Figura 136. Panel para la gestión del stack de baterías de litio (LI).

Dichas funcionalidades son las siguientes:

- **Monitorización del estado de operación del stack.** Mediante los indicadores situados a la izquierda del panel, dentro del recuadro *States*, pueden monitorizarse los tres estados de funcionamiento del stack, que son *Normal Operation*, *Warning* y *Error* (Figura 137).
- **Monitorización de las magnitudes del stack.** Mediante los indicadores situados en la zona central del panel (Figura 138), pueden monitorizarse las siguientes magnitudes:
 - *Lithium Battery Stack Voltage (V)*. Tensión del stack.
 - *Lithium Battery Stack Current (A)*. Intensidad del stack.
 - *Lithium Battery State of Charge (%)*. Estado de carga del stack.
 - *Lithium Battery average cell voltage (V)*. Tensión de celda promedio.
 - *Lithium Battery lowest cell voltage (V)*. Tensión de celda mínima.
 - *Lithium Battery average cell temperature (°C)*. Temperatura de celda promedio.
 - *Lithium Battery highest cell temperature (°C)*. Temperatura de celda máxima.
 - *Cell 1 Voltage (V) ... Cell 16 Voltage (V)*. Tensiones de cada una de las 16 celdas que componen el stack.
 - *Cell 1 Temperature (°C) ... Cell 16 Temperature (°C)*. Temperaturas de cada una de las 16 celdas que componen el stack.
- **Monitorización de los flags de aviso del stack LI.** Existen unos límites máximos y mínimos para la tensión y la intensidad de stack, las tensiones de celda y el estado de carga del stack. Cuando se

superan, debe proporcionarse un aviso al usuario sin interrumpir el funcionamiento de la Microrred. El conjunto de flags situados en la parte inferior izquierda de la pantalla (Figura 139), dentro del recuadro *Warning Flags*, permiten monitorizar al usuario la activación de un conjunto de flags con los cuales se indican la superación de dichos límites. Los valores de los límites de aviso para la tensión y la corriente del stack son programados en el EMS por el fabricante, y como dependen de la manera en que estén asociadas las celdas no los especifican. Los valores de los límites de aviso para las tensiones de celda y el SOC del stack LI están programados en el *First Level Controller*, y son los que se indican en la Tabla 110.

Tabla 110. Límites de aviso para el stack de baterías de litio.

Warning Limits of Lithium Battery Stack	
Cell voltage high limit (V)	4.5
Cell voltage low limit (V)	2.7
SOC high limit (%)	90.0
SOC low limit (%)	45.0

- **Monitorización de los flags de error del stack.** Se tiene un conjunto de condiciones de error para el stack. Cuando se da alguna de ellas, la Microrred debe entrar en el estado de emergencia para evitar daños irreversibles en el stack. Dichas condiciones de error son las siguientes:
 - **Pack to chassis detected.** Detección de derivación al chasis. Esta condición se produce cuando la intensidad que se mide con la resistencia de shunt colocada en el cableado de salida del stack es inferior a la suma de las intensidades medidas para cada celda individual a través de sus BMSs, lo cual será debido a una derivación.
 - **Pack to cell communication error.** Esta condición se produce cuando la cantidad de BMSs de las celdas individuales que se comunican con el EMS del stack es menor al número que celdas que se han configurado en este.
 - **System error.** Error general del EMS.
 - **Cell temp too high.**
 - **Stack voltage too high.**
 - **Stack voltage too low.**
 - **Stack current too high.**
 - **Cell voltage too high.** Esta condición se produce cuando la tensión en alguna de las celdas supera los 4.5 V.
 - **Cell voltage too low.** Esta condición se produce cuando la tensión en alguna de las celdas desciende por debajo de 2.5 V.
 - **SOC too high.** Esta condición se produce cuando el SOC del stack LI supera el 95.0 %.
 - **SOC too low.** Esta condición se produce cuando el SOC del stack LI desciende del 40.0 %.

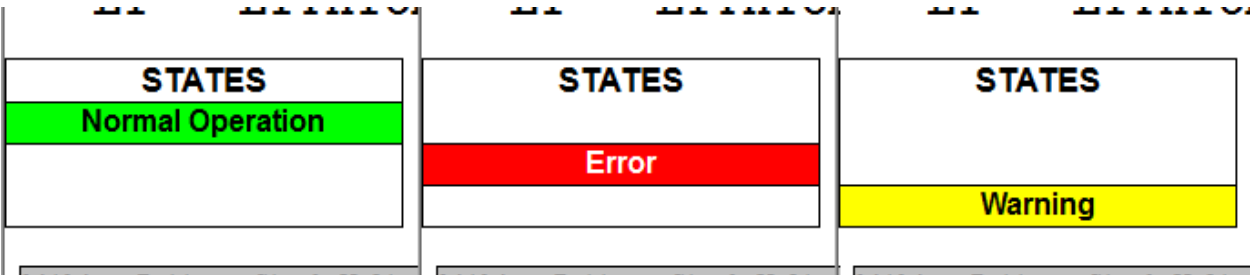


Figura 137. Indicadores para los estados de funcionamiento del stack de baterías de litio (LI).

Lithium Battery Stack Voltage (V)	61.12	Cell 1 Voltage (V)	3.82	Cell 1 Temperature (°C)	22.00
Lithium Battery Stack Current (A)	0.01	Cell 2 Voltage (V)	3.82	Cell 2 Temperature (°C)	22.00
Lithium Battery State of Charge (%)	72.00	Cell 3 Voltage (V)	3.82	Cell 3 Temperature (°C)	22.00
Lithium Battery average cell voltage (V)	3.82	Cell 4 Voltage (V)	3.82	Cell 4 Temperature (°C)	22.00
Lithium Battery highest cell voltage (V)	3.82	Cell 5 Voltage (V)	3.82	Cell 5 Temperature (°C)	22.00
Lithium Battery lowest cell voltage (V)	3.82	Cell 6 Voltage (V)	3.82	Cell 6 Temperature (°C)	22.00
Lithium Battery average cell temperature (°C)	22.00	Cell 7 Voltage (V)	3.82	Cell 7 Temperature (°C)	22.00
Lithium Battery highest cell temperature (°C)	22.00	Cell 8 Voltage (V)	3.82	Cell 8 Temperature (°C)	22.00
		Cell 9 Voltage (V)	3.82	Cell 9 Temperature (°C)	22.00
		Cell 10 Voltage (V)	3.82	Cell 10 Temperature (°C)	22.00
		Cell 11 Voltage (V)	3.82	Cell 11 Temperature (°C)	22.00
		Cell 12 Voltage (V)	3.82	Cell 12 Temperature (°C)	22.00
		Cell 13 Voltage (V)	3.82	Cell 13 Temperature (°C)	22.00
		Cell 14 Voltage (V)	3.82	Cell 14 Temperature (°C)	22.00
		Cell 15 Voltage (V)	3.82	Cell 15 Temperature (°C)	22.00
		Cell 16 Voltage (V)	3.82	Cell 16 Temperature (°C)	22.00

Figura 138. Indicadores para la monitorización de las magnitudes del stack de baterías de litio (LI).

WARNING FLAGS	0000000000000000
LSB	
00 Stack voltage high	
01 Stack voltage low	
02 Stack current high	
03 Cell voltage high	
04 Cell voltage low	
05 SOC high	
06 SOC low	
MSB	

Figura 139. Indicador para los flags de aviso del stack de baterías de litio (LI).

ERROR FLAGS	0000000000000000
LSB	
00 Pack to chassis detected	
01 Pack to cell communication error	
02 System error	
03 Cell temp too high	
04 Stack voltage too high	
05 Stack voltage too low	
06 Stack current too high	
07 Cell voltage too high	
08 Cell voltage too low	
09 SOC too high	
10 SOC too low	
MSB	

Figura 140. Indicador para los flags de error del stack de baterías de litio (LI).

7.2.8 Panel Gestión DC/DC Baterías de Litio

A través de esta pantalla, el usuario tiene acceso a todas las funcionalidades relativas al manejo del convertidor DC/DC ESS3 asociado al stack de baterías de litio, designado CLI (*Converter - Lithium*). Su apariencia es la que se muestra en la Figura 141.

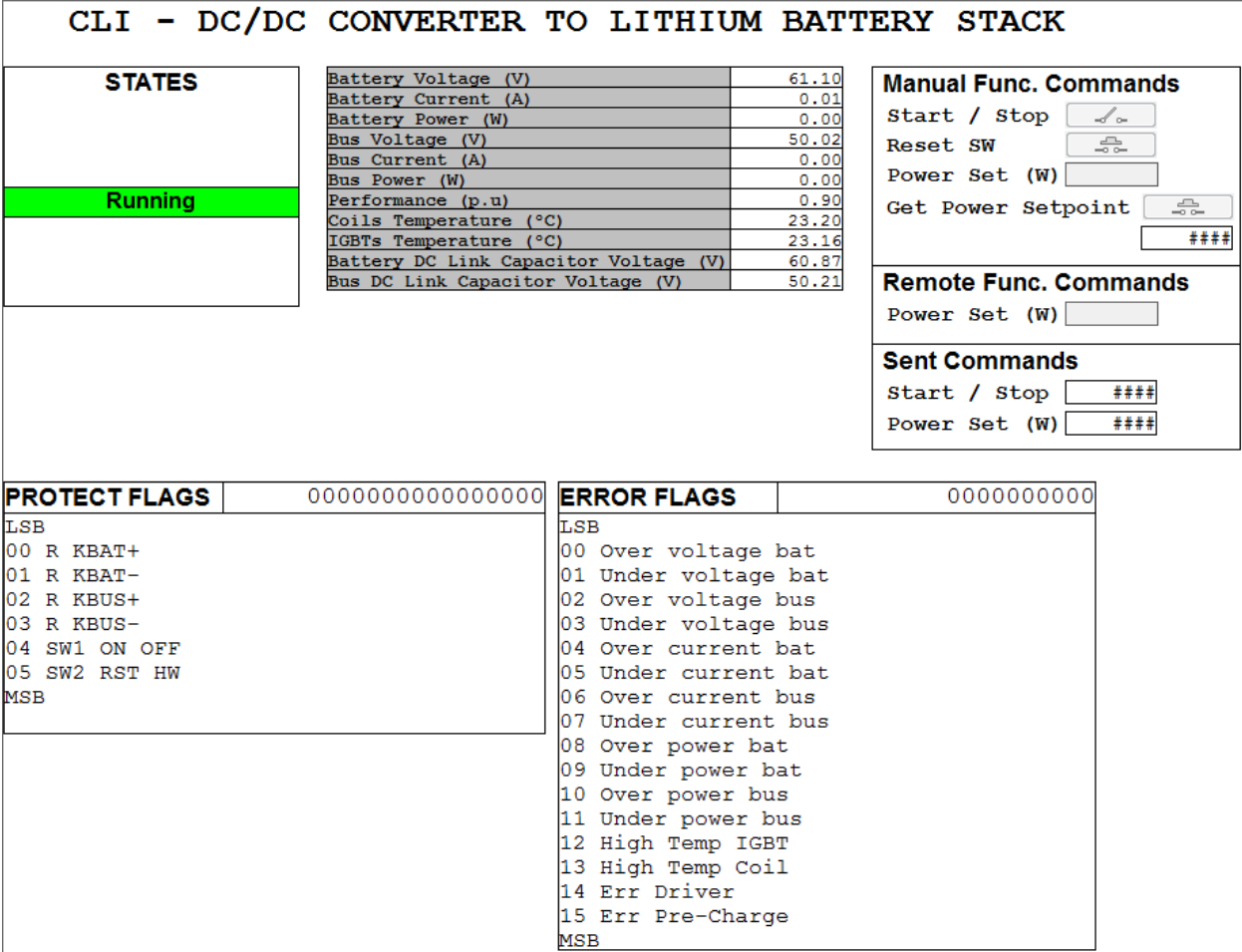


Figura 141. Panel para la gestión del convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (CLI).

Dichas funcionalidades son las siguientes:

- **Monitorización del estado de funcionamiento del convertidor.** Mediante los indicadores situados a la izquierda del panel, dentro del recuadro *States* (Figura 142), pueden monitorizarse los diferentes estados del convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio. Estos estados son los siguientes:
 - **Waiting Starting Command.** Estado de reposo después de error. El equipo permanece en este estado hasta que recibe una orden de rearme.
 - **Waiting Battery & Bus Voltage.** Estado de espera para el establecimiento de las tensiones en los buses conectados a la batería y al bus principal de la Microrred.
 - **Precharging.** Precarga de condensadores DC-Link.
 - **Running.** Estado de marcha. El equipo está en funcionamiento e inyectando/extrayendo potencia del stack de baterías de litio.
 - **Standby.** Estado de reposo. El equipo está preparado para operar.
 - **Error.** Estado de error. En caso de fallo el *Front End Controller* del equipo transiciona a este estado de seguridad, en el cual se interrumpe la inyección o la extracción de potencia de las baterías. Una vez desaparece el fallo, el FEC transiciona hacia el estado *Waiting Starting Command*, y permanece en él a la espera de la orden de rearme.

- **Monitorización de las magnitudes del convertidor.** Mediante los indicadores situados en la zona central superior del panel (Figura 143), pueden monitorizarse las siguientes magnitudes:
 - **Battery Voltage (V).** Tensión en el bus del convertidor conectado al stack de baterías de litio.
 - **Battery Current (A).** Intensidad en el bus del convertidor conectado al stack de baterías de litio.
 - **Battery Power (W).** Potencia en el bus del convertidor conectado al stack de baterías de litio.
 - **Bus Voltage (V).** Tensión en el bus del convertidor conectado al bus principal de la Microrred.
 - **Bus Current (A).** Intensidad en el bus del convertidor conectado al bus principal de la microrred.
 - **Bus Power (W).** Potencia en el bus del convertidor conectado al bus principal de la Microrred.
 - **Performance (p.u).** Rendimiento del convertidor, expresado en tanto por uno.
 - **Coils Temperature (°C).** Temperatura de las bobinas del convertidor.
 - **IGBTs Temperature (°C).** Temperatura de los IGBTs.
 - **Battery DC Link Capacitor Voltage (V).** Tensión del condensador DC-Link del bus conectado al stack de baterías de litio.
 - **Bus DC Link Capacitor Voltage (V).** Tensión del condensador DC-Link del bus conectado al bus principal de la Microrred.
- **Monitorización de los registros de error del convertidor.** Mediante los indicadores situados en la zona inferior derecha del panel, en el recuadro *Error Flags* (Figura 144), puede monitorizarse la activación de los flags de error del convertidor.
- **Monitorización de los registros de protección del convertidor.** Mediante los indicadores situados en la zona inferior izquierda del panel, en el recuadro *Protect Flags* (Figura 145), puede monitorizarse la activación de los flags de protección del convertidor.
- **Envío de comandos al convertidor en el Modo de Funcionamiento Manual y en el modo D1.2 Diagnosis.** Mediante los controles situados a la derecha del panel, en el recuadro *Manual Func. Commands* (Figura 146), pueden enviarse al convertidor órdenes de arranque, parada y rearme, así como consignas de potencia, y también solicitar la lectura de la consigna de potencia que está almacenada en el *Front End Controller* del convertidor, en el Modo de Funcionamiento Manual o en el modo D1.2 Diagnosis. Estos controles sólo están habilitados cuando la Microrred se encuentra en dichos modos de operación, estando deshabilitados para el resto.
- **Arranque, apagado y envío de consignas al convertidor en el Modo de Funcionamiento Remoto.** Mediante el control situado a la derecha del panel, en el recuadro *Remote Func. Commands* (Figura 147), puede realizarse el arranque, la parada y el envío de consignas al convertidor en el Modo de Funcionamiento Remoto. Cuando se introduce un valor de consigna mayor en valor absoluto a cierto umbral, se envía de manera automática la orden de arranque al convertidor, y posteriormente, cuando alcanza el estado de marcha, se le envía el valor de la consigna. Cuando se introduce un valor de consigna menor a dicho umbral, entonces se le envía al convertidor una consigna de potencia igual a cero y, cuando la potencia en el lado del bus cae por debajo de dicho umbral, se envía una orden de parada. Por defecto, el valor umbral para el arranque y apagado del convertidor en el Modo de Funcionamiento Remoto es de 10 W.
- **Monitorización de comandos y consignas enviados al convertidor.** Mediante los indicadores situados a la derecha del panel, en el recuadro *Sent Commands* (Figura 148), pueden monitorizarse los comandos y las consignas de potencia enviadas al convertidor en cualquiera de los modos y estados de operación de la Microrred. Se ha incluido este elemento en la interfaz de usuario del *First Level Control* para verificar que los comandos enviados al convertidor son correctos, tanto con propósitos

de depuración del programa que implementa el *First Level Controller* como para la depuración de los algoritmos de control del *Second Level Controller*.

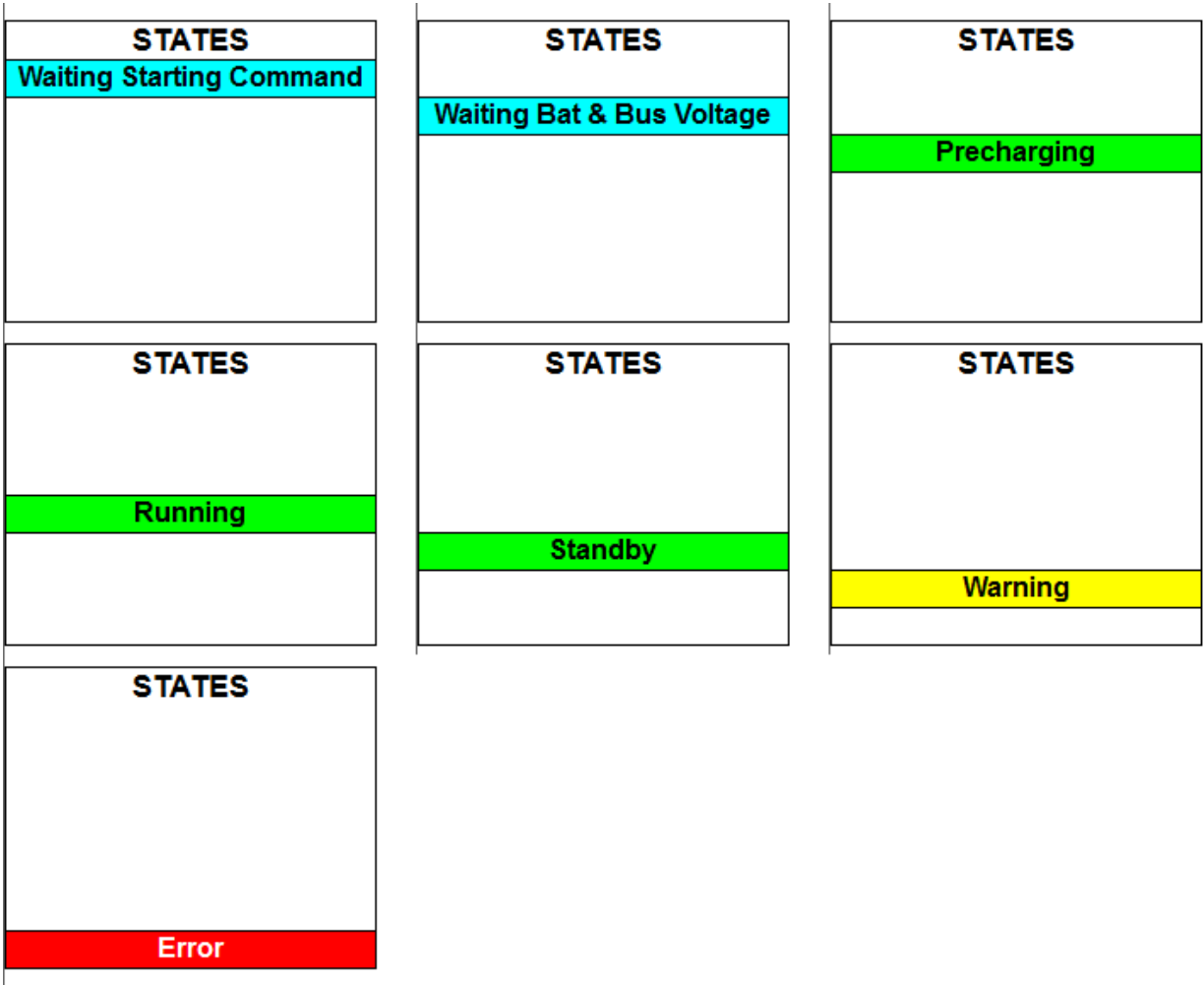


Figura 142. Indicadores para la monitorización del estado de funcionamiento del convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (CLI).

CONVERTER TO BATTERY DATA

Battery Voltage (V)	61.10
Battery Current (A)	0.01
Battery Power (W)	0.00
Bus Voltage (V)	50.02
Bus Current (A)	0.00
Bus Power (W)	0.00
Performance (p.u)	0.90
Coils Temperature (°C)	23.20
IGBTs Temperature (°C)	23.16
Battery DC Link Capacitor Voltage (V)	60.87
Bus DC Link Capacitor Voltage (V)	50.21

Figura 143. Indicadores para la monitorización de las magnitudes del convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (CLI).

0	ERROR FLAGS	0000000000
	LSB	
	00 Over voltage bat	
	01 Under voltage bat	
	02 Over voltage bus	
	03 Under voltage bus	
	04 Over current bat	
	05 Under current bat	
	06 Over current bus	
	07 Under current bus	
	08 Over power bat	
	09 Under power bat	
	10 Over power bus	
	11 Under power bus	
	12 High Temp IGBT	
	13 High Temp Coil	
	14 Err Driver	
	15 Err Pre-Charge	
	MSB	

Figura 144. Indicadores para la monitorización del registro con los flags de error del convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (CLI).

PROTECT FLAGS	0000000000000000	ER
LSB		LSE
00 R KBAT+		00
01 R KBAT-		01
02 R KBUS+		02
03 R KBUS-		03
04 SW1 ON OFF		04
05 SW2 RST HW		05
MSB		06
		07
		08

Figura 145. Indicadores para la monitorización del registro con los flags de protección del convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (CLI).

10
01
00
02
00
00
90
20
16
87

Manual Func. Commands

Start / stop

Reset SW

Power Set (W)

Get Power Setpoint

####

Figura 146. Controles para el envío de comandos y consignas de potencia al convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (CLI) en el Modo de Funcionamiento Manual y en el modo D1.2 Diagnosis.

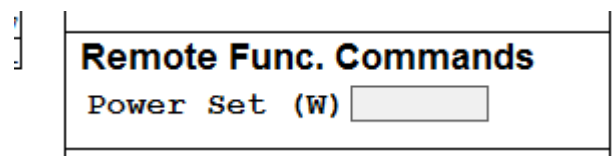


Figura 147. Control para el arranque/parada automático y envío de consignas al convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (CLI) en el Modo de Funcionamiento Remoto.

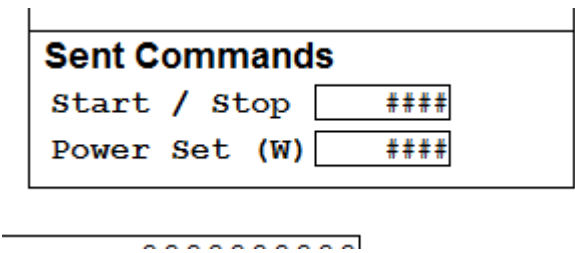


Figura 148. Indicadores para la monitorización de los comandos y consignas enviados al convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (CLI).

7.2.9 Panel Gestión Electrolizador

A través de esta pantalla, el usuario tiene acceso a todas las funcionalidades relativas al manejo del electrolizador ELS500 de Acta Heliocentris, designado EL (*Electrolyzer*). Su apariencia es la que se muestra en la Figura 145.

EZ - ELECTROLYZER																																																																			
<table border="1"> <thead> <tr> <th>SYSTEM STATES</th> <th>SYSTEM SUBSTATES</th> <th>DRYER STATES</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td></td> <td>Dryer Standby</td> </tr> <tr> <td>Steady</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	SYSTEM STATES	SYSTEM SUBSTATES	DRYER STATES			Dryer Standby	Steady			<table border="1"> <tbody> <tr><td>Stack 1 Voltage (V)</td><td>34.65</td></tr> <tr><td>Stack 1 Current (A)</td><td>34.61</td></tr> <tr><td>Stack 2 Voltage (V)</td><td>23.56</td></tr> <tr><td>Stack 2 Current (A)</td><td>23.53</td></tr> <tr><td>Module A Power Consumption (W)</td><td>1631.00</td></tr> <tr><td>Module A Stacks Pressure (bar)</td><td>33.11</td></tr> <tr><td>Module A Buffer Pressure (bar)</td><td>32.53</td></tr> <tr><td>Output Pressure (bar)</td><td>1.57</td></tr> <tr><td>Hydrogen Flow Rate Production (Nl/h)</td><td>400.86</td></tr> <tr><td>Module A Water Temperature (°C)</td><td>30.52</td></tr> <tr><td>Dryer Pressure (bar)</td><td>1.57</td></tr> <tr><td>Dryer Temperature Sensor 0 (°C)</td><td>153.44</td></tr> <tr><td>Dryer Temperature Sensor 1 (°C)</td><td>30.52</td></tr> <tr><td>Quantity of Stack 1 Production Cycles</td><td>32</td></tr> <tr><td>Quantity of Stack 2 Production Cycles</td><td>32</td></tr> </tbody> </table>	Stack 1 Voltage (V)	34.65	Stack 1 Current (A)	34.61	Stack 2 Voltage (V)	23.56	Stack 2 Current (A)	23.53	Module A Power Consumption (W)	1631.00	Module A Stacks Pressure (bar)	33.11	Module A Buffer Pressure (bar)	32.53	Output Pressure (bar)	1.57	Hydrogen Flow Rate Production (Nl/h)	400.86	Module A Water Temperature (°C)	30.52	Dryer Pressure (bar)	1.57	Dryer Temperature Sensor 0 (°C)	153.44	Dryer Temperature Sensor 1 (°C)	30.52	Quantity of Stack 1 Production Cycles	32	Quantity of Stack 2 Production Cycles	32																											
SYSTEM STATES	SYSTEM SUBSTATES	DRYER STATES																																																																	
		Dryer Standby																																																																	
Steady																																																																			
Stack 1 Voltage (V)	34.65																																																																		
Stack 1 Current (A)	34.61																																																																		
Stack 2 Voltage (V)	23.56																																																																		
Stack 2 Current (A)	23.53																																																																		
Module A Power Consumption (W)	1631.00																																																																		
Module A Stacks Pressure (bar)	33.11																																																																		
Module A Buffer Pressure (bar)	32.53																																																																		
Output Pressure (bar)	1.57																																																																		
Hydrogen Flow Rate Production (Nl/h)	400.86																																																																		
Module A Water Temperature (°C)	30.52																																																																		
Dryer Pressure (bar)	1.57																																																																		
Dryer Temperature Sensor 0 (°C)	153.44																																																																		
Dryer Temperature Sensor 1 (°C)	30.52																																																																		
Quantity of Stack 1 Production Cycles	32																																																																		
Quantity of Stack 2 Production Cycles	32																																																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>ERROR FLAGS</th> <th>0000000000000000</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>LSB</td><td></td></tr> <tr><td>00 Water purifier</td><td></td></tr> <tr><td>01 Leak dryer</td><td></td></tr> <tr><td>02 Dryer</td><td></td></tr> <tr><td>03 Temperature sensor</td><td></td></tr> <tr><td>04 Pressure sensor</td><td></td></tr> <tr><td>06 Refill</td><td></td></tr> <tr><td>08 Leak stack</td><td></td></tr> <tr><td>10 Stack voltage</td><td></td></tr> <tr><td>11 Stack current</td><td></td></tr> <tr><td>12 Water level sensor</td><td></td></tr> <tr><td>13 Pressure switch</td><td></td></tr> <tr><td>14 Fan</td><td></td></tr> <tr><td>15 Flow switch</td><td></td></tr> <tr><td>MSB</td><td></td></tr> </tbody> </table>	ERROR FLAGS	0000000000000000	LSB		00 Water purifier		01 Leak dryer		02 Dryer		03 Temperature sensor		04 Pressure sensor		06 Refill		08 Leak stack		10 Stack voltage		11 Stack current		12 Water level sensor		13 Pressure switch		14 Fan		15 Flow switch		MSB		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Manual Func. Commands</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Start / Stop</td><td><input type="button" value="Start / Stop"/></td></tr> <tr><td>Rearm</td><td><input type="button" value="Rearm"/></td></tr> <tr><td>Power Set (W)</td><td><input type="text"/></td></tr> <tr><td>Get H2 F Set (%)</td><td><input type="text"/></td></tr> <tr><td></td><td>###</td></tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Remote Func. Commands</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Power Set (W)</td><td><input type="text"/></td></tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Sent Commands</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Start / Stop</td><td>###</td></tr> <tr><td>Power Set (W)</td><td>###</td></tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Hist. Cont. to H2 Prod</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Ena Control</td><td><input type="button" value="Ena Control"/></td></tr> <tr><td>EZ_Buffer_Press_hth_r</td><td><input type="text"/></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td>EZ_Buffer_Press_hth_r</td><td><input type="text"/></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>	Manual Func. Commands		Start / Stop	<input type="button" value="Start / Stop"/>	Rearm	<input type="button" value="Rearm"/>	Power Set (W)	<input type="text"/>	Get H2 F Set (%)	<input type="text"/>		###	Remote Func. Commands		Power Set (W)	<input type="text"/>	Sent Commands		Start / Stop	###	Power Set (W)	###	Hist. Cont. to H2 Prod		Ena Control	<input type="button" value="Ena Control"/>	EZ_Buffer_Press_hth_r	<input type="text"/>			EZ_Buffer_Press_hth_r	<input type="text"/>		
ERROR FLAGS	0000000000000000																																																																		
LSB																																																																			
00 Water purifier																																																																			
01 Leak dryer																																																																			
02 Dryer																																																																			
03 Temperature sensor																																																																			
04 Pressure sensor																																																																			
06 Refill																																																																			
08 Leak stack																																																																			
10 Stack voltage																																																																			
11 Stack current																																																																			
12 Water level sensor																																																																			
13 Pressure switch																																																																			
14 Fan																																																																			
15 Flow switch																																																																			
MSB																																																																			
Manual Func. Commands																																																																			
Start / Stop	<input type="button" value="Start / Stop"/>																																																																		
Rearm	<input type="button" value="Rearm"/>																																																																		
Power Set (W)	<input type="text"/>																																																																		
Get H2 F Set (%)	<input type="text"/>																																																																		
	###																																																																		
Remote Func. Commands																																																																			
Power Set (W)	<input type="text"/>																																																																		
Sent Commands																																																																			
Start / Stop	###																																																																		
Power Set (W)	###																																																																		
Hist. Cont. to H2 Prod																																																																			
Ena Control	<input type="button" value="Ena Control"/>																																																																		
EZ_Buffer_Press_hth_r	<input type="text"/>																																																																		
EZ_Buffer_Press_hth_r	<input type="text"/>																																																																		

Figura 149. Panel para la gestión del electrolizador (EL).

Dichas funcionalidades son las siguientes:

- **Monitorización de los estados y subestados de funcionamiento del electrolizador y del secador.** Mediante los indicadores situados a la izquierda del panel, dentro de los recuadros *System States*, *System Substates* y *Dryer States* (Figura 150, Figura 151 y Figura 152), pueden monitorizarse los diferentes estados y subestados de funcionamiento del electrolizador, así como el estado del secador.

Los estados de funcionamiento del electrolizador son los siguientes:

- **Power On.** Proceso de inicialización del electrolizador cuando se conecta a la alimentación.
- **Standby.** Estado de reposo del electrolizador, a la espera de recibir la orden de marcha.
- **Ramp Up.** Cuando el electrolizador recibe una orden de marcha, se realiza una secuencia de arranque en la cual se activa el secador, se hidratan los stacks y comienza a generarse hidrógeno siguiendo una rampa de subida en el caudal generado controlada por el *Front End Controller* del equipo. Cuando la presión del hidrógeno en los stacks supera los 30 bares, finaliza el proceso de arranque.
- **Steady.** Estado de marcha. El electrolizador produce hidrógeno según la consigna de caudal que se le envía.
- **Ramp Down.** Cuando el electrolizador recibe una orden de parada, se realiza una secuencia de apagado en la cual se corta la producción de hidrógeno y se despresurizan los stacks.
- **Purge.** Después de 10 horas de producir hidrógeno ininterrumpidamente, el electrolizador se detiene durante diez minutos para realizar un proceso de purga, y vuelve a arrancar de forma

automática.

- **Heating.** Fase de calentamiento. Se produce cuando la temperatura en el sistema de acondicionamiento del hidrógeno no ha alcanzado el mínimo requerido.
- **Error.** Estado de error.
- **Warning.**
- **Monitorización de las magnitudes del electrolizador.** Mediante los indicadores situados en la parte derecha superior del panel (Figura 153), pueden monitorizarse las siguientes magnitudes:
 - **Stack 1 Voltage (V).** Tensión en el Stack 1.
 - **Stack 1 Current (A).** Intensidad en el Stack 1.
 - **Stack 2 Voltage (V).** Tensión en el Stack 2.
 - **Stack 2 Current (A).** Intensidad en el Stack 2.
 - **Module A Power Consumption (W).** Consumo de potencia del Módulo A. El Módulo A está integrado por los stacks 1 y 2.
 - **Module A Stacks Pressure (bar).** Presión de los stacks del Módulo A.
 - **Module A Buffer Pressure (bar).** Presión del buffer de salida del Módulo A. El buffer de salida amortigua las fluctuaciones en la presión del hidrógeno a la salida del electrolizador para que la presión en los stacks no descienda de 30 bares.
 - **Output Pressure (bar).** Presión del hidrógeno a la salida del electrolizador, en el punto de conexión con la red externa.
 - **Hydrogen Flow Rate Production (NL/h).** Caudal de hidrógeno producido, en normal-litro por hora.
 - **Module A Water Temperature (°C).** Temperatura del agua en el Módulo A.
 - **Dryer Pressure (bar).** Presión del secador de hidrógeno.
 - **Dryer Temperature Sensor 0 (°C).**
 - **Dryer Temperature Sensor 1 (°C).**
 - **Quantity of Stack 1 Production Cycles.**
 - **Quantity of Stack 2 Production Cycles.**
- **Monitorización del registro de errores del electrolizador.** Mediante el indicador situado en la parte inferior derecha del panel, en el recuadro *Error Flags* (Figura 154), puede monitorizarse la activación de los flags de error del electrolizador.
- **Envío de comandos al electrolizador en el Modo de Funcionamiento Manual y en el modo D1.2 Diagnosis.** Mediante los controles situados a la derecha del panel, en el recuadro *Manual Func. Commands* (Figura 155), pueden enviarse al electrolizador órdenes de arranque, parada y rearme, así como consignas de potencia que son traducidas a setpoints de caudal, y también solicitar la lectura de la consigna de caudal que está almacenada en el *Front End Controller* del electrolizador convertida en potencia, en el Modo de Funcionamiento Manual o en el modo D1.2 Diagnosis. Estos controles solo están habilitados cuando la Microrred se encuentra en dichos modos de operación, estando deshabilitados para el resto.
- **Arranque, apagado y envío de consignas al electrolizador en el Modo de Funcionamiento Remoto.** Mediante el control situado a la derecha del panel, en el recuadro *Remote Func. Commands* (Figura 156), puede realizarse el arranque, la parada y el envío de consignas al electrolizador en el Modo de Funcionamiento Remoto. Cuando se introduce un valor de consigna superior a cierto umbral, se envía de manera automática la orden de arranque al electrolizador, y cuando alcanza el estado de marcha, después de haber completado el proceso de arranque, se le envía el valor de la consigna. Cuando se introduce un valor de consigna menor a dicho umbral, se le envía al

electrolizador dicho valor y posteriormente una orden de parada. Por defecto, el valor umbral de la consigna para el arranque y apagado del electrolizador es de 600 W.

- **Monitorización de comandos y consignas enviados al electrolizador.** Mediante los indicadores situados a la derecha del panel, en el recuadro *Sent Commands* (Figura 157), pueden monitorizarse los comandos y las consignas enviadas al electrolizador en cualquiera de los modos y estados de operación de la Microrred. Se ha incluido este elemento en la interfaz de usuario del *First Level Control* para verificar que los comandos enviados al electrolizador son correctos, tanto con propósitos de depuración del programa que implementa el *First Level Controller* como para la depuración de los algoritmos de control del *Second Level Controller*.
- **Habilitación y ajuste de los umbrales para el control por histéresis de la presión de los stacks.** Para que el electrolizador pueda producir hidrógeno de manera estable, la presión en los stacks debe mantenerse entre 30 y 35 bares. Si dicha presión cae por debajo de los 30 bares, lo cual suele ocurrir ante un decremento en la consigna de caudal, el electrolizador incrementará su producción hasta alcanzar el caudal máximo de 510 NI/h, a despecho de la consigna que se le hubiera enviado, con el fin de recuperar la presión, consumiendo una mayor potencia del bus principal de la Microrred, hasta alcanzar nuevamente los 30 bares. Por otro lado, si la presión en los stacks supera los 35 bares, por razones de seguridad el electrolizador entra en estado de emergencia y detiene la producción de hidrógeno.

Para mantener la presión de los stacks entre los 30 y los 35 bares se ha implementado un control por histéresis que actúa sobre una electroválvula colocada en el circuito de hidrógeno de la Microrred justo a la salida del electrolizador. Cuando la presión en los stacks desciende por debajo de cierto valor umbral inferior, la electroválvula se cierra para que los stacks recuperen presión y así evitar que su presión caiga por debajo de los 30 bares. Y cuando la presión supera cierto valor umbral superior, la electroválvula vuelve a abrirse, permitiendo el paso del hidrógeno hacia los tanques de hidruros.

Mediante los controles situados a la derecha del panel, en el recuadro *Hist. Cont. to H2 Prod* (Figura 158), puede habilitarse ó deshabilitarse este control, así como ajustar sus valores umbrales. Por defecto, el umbral inferior tiene un valor de 31.0 bares, y el umbral superior 33.5 bares.

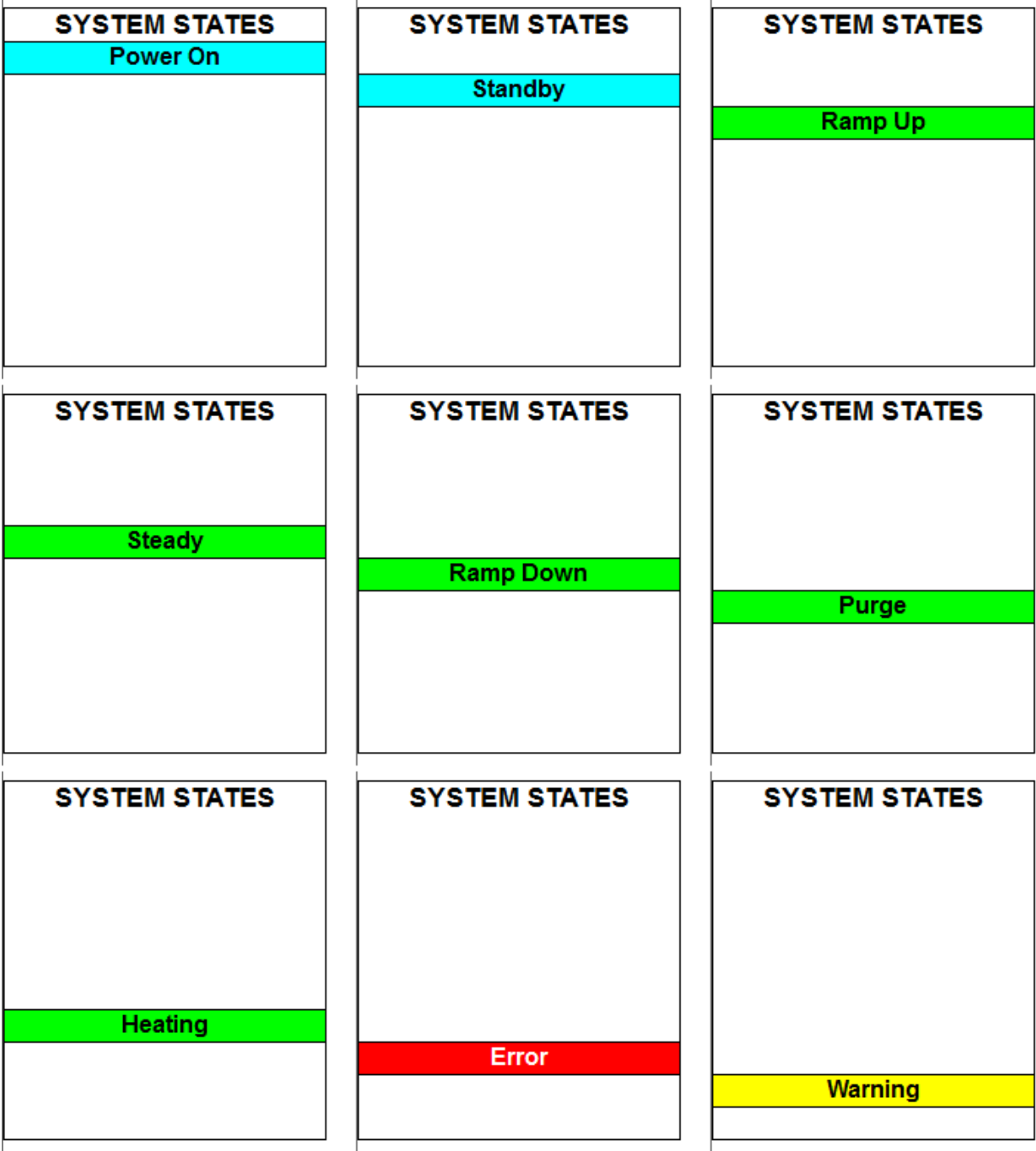


Figura 150. Monitorización de los estados de funcionamiento del electrolizador (EL).

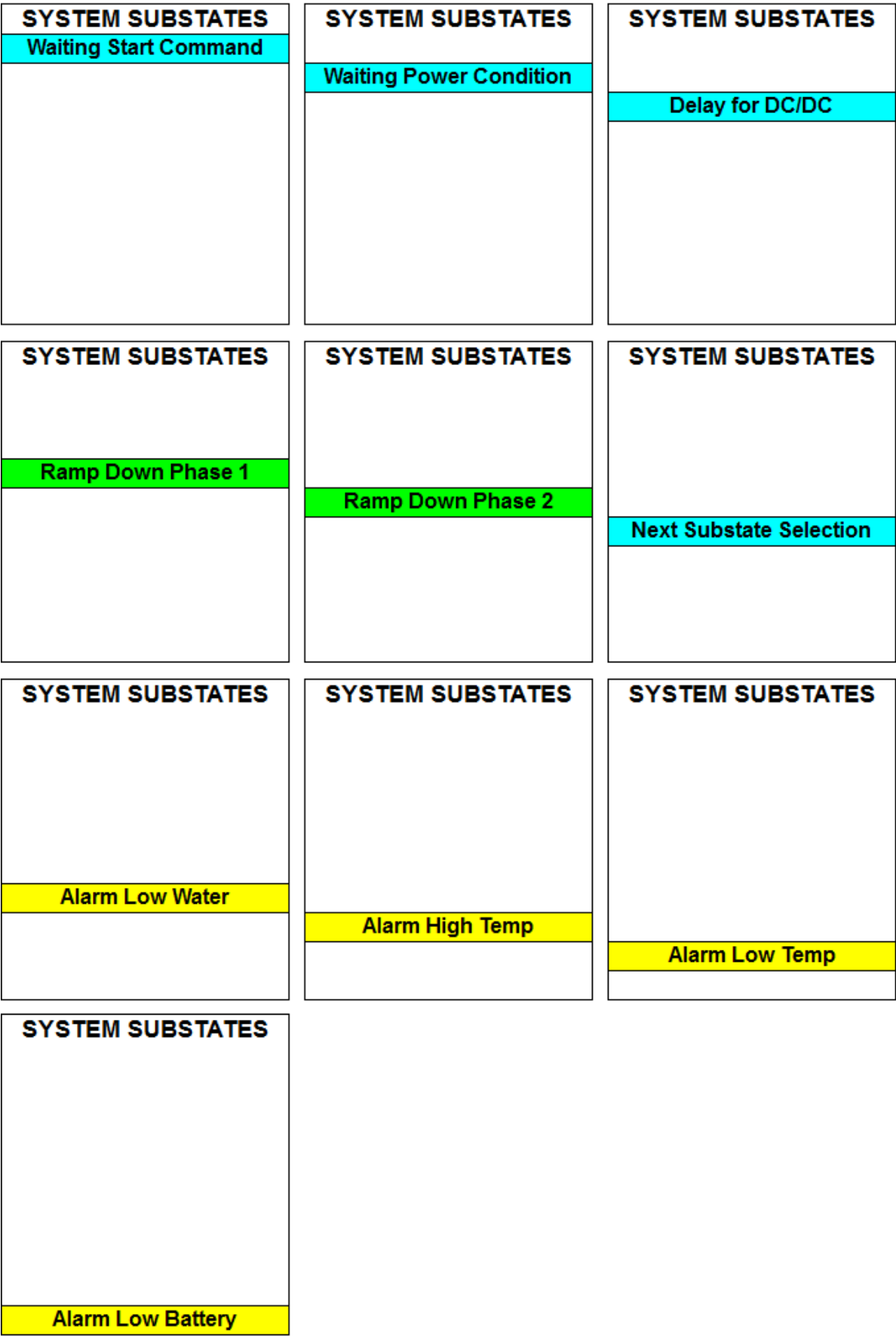


Figura 151. Monitorización de los subestados de funcionamiento del electrolizador (EL).

DRYER STATES	DRYER STATES
Dryer Standby	Dryer Error

Figura 152. Monitorización del estado del secador.

Stack 1 Voltage (V)	34.65
Stack 1 Current (A)	34.61
Stack 2 Voltage (V)	23.56
Stack 2 Current (A)	23.53
Module A Power Consumprtion (W)	1631.00
Module A Stacks Pressure (bar)	33.11
Module A Buffer Pressure (bar)	32.53
Output Pressure (bar)	1.57
Hydrogen Flow Rate Production (Nl/h)	400.86
Module A Water Temperature (°C)	30.52
Dryer Pressure (bar)	1.57
Dryer Temperature Sensor 0 (°C)	153.44
Dryer Temperature Sensor 1 (°C)	30.52
Quantity of Stack 1 Production Cycles	32
Quantity of Stack 2 Production Cycles	32

Figura 153. Indicadores para la monitorización de las magnitudes del electrolizador (EL).

ERROR FLAGS	0000000000000000
LSB	
00 Water purifier	
01 Leak dryer	
02 Dryer	
03 Temperature sensor	
04 Pressure sensor	
06 Refill	
08 Leak stack	
10 Stack voltage	
11 Stack current	
12 Water level sensor	
13 Pressure switch	
14 Fan	
15 Flow switch	
MSB	

Figura 154. Indicadores para la monitorización del registro con los flags de error del electrolizador (EL).

Manual Func. Commands

Start / Stop

Rearm

Power Set (W)

Get H2 F Set (%)

####

Figura 155. Controles para el envío de comandos y consignas de potencia al electrolizador (EL) en el Modo de Funcionamiento Manual y en el modo D1.2 Diagnosis.

Remote Func. Commands

Power Set (W)

Figura 156. Control para el arranque/parada automático y envío de consignas al electrolizador (EL) en el Modo de Funcionamiento Remoto.

Sent Commands

Start / Stop

####

Power Set (W)

####

Figura 157. Indicadores para la monitorización de los comandos y consignas enviados al electrolizador (EL).

Hist. Cont. to H2 Prod

Ena Control

EZ_Buffer_Press_hth_r

EZ_Buffer_Press_hth_r

Figura 158. Controles para la habilitación/deshabilitación y ajuste de umbrales para el control por histéresis de la presión de los stacks.

7.2.10 Panel Gestión H2 Fuel Cell

A través de esta pantalla, el usuario tiene acceso a todas las funcionalidades relativas al manejo de la pila de hidrógeno NEXA 1200 de Acta Heliocentris, designada FC (*Fuel Cell*). Su apariencia es la que se muestra en la Figura 159.

FC - HYDROGEN FUEL CELL																							
STATES <div style="background-color: green; color: black; text-align: center; padding: 2px;">Running</div>	<table border="1"> <tr><td>System Voltage (V)</td><td>2.42</td></tr> <tr><td>System Current Self cons (A)</td><td>2.43</td></tr> <tr><td>System Pressure (mbar)</td><td>310.00</td></tr> <tr><td>Stack Voltage (V)</td><td>22.73</td></tr> <tr><td>Stack Current (A)</td><td>55.21</td></tr> <tr><td>Stack Temperature (°C)</td><td>60.33</td></tr> <tr><td>H2 Inlet Pressure (bar)</td><td>3.20</td></tr> <tr><td>H2 Concentration (ppm)</td><td>96.00</td></tr> <tr><td>Ambient Temperature (°C)</td><td>22.96</td></tr> <tr><td>Fan Speed (rpm)</td><td>1829.00</td></tr> </table>	System Voltage (V)	2.42	System Current Self cons (A)	2.43	System Pressure (mbar)	310.00	Stack Voltage (V)	22.73	Stack Current (A)	55.21	Stack Temperature (°C)	60.33	H2 Inlet Pressure (bar)	3.20	H2 Concentration (ppm)	96.00	Ambient Temperature (°C)	22.96	Fan Speed (rpm)	1829.00	Manual Func. Commands Start / Stop <input type="button" value="On"/> Rearm <input type="button" value="On"/>	
	System Voltage (V)	2.42																					
System Current Self cons (A)	2.43																						
System Pressure (mbar)	310.00																						
Stack Voltage (V)	22.73																						
Stack Current (A)	55.21																						
Stack Temperature (°C)	60.33																						
H2 Inlet Pressure (bar)	3.20																						
H2 Concentration (ppm)	96.00																						
Ambient Temperature (°C)	22.96																						
Fan Speed (rpm)	1829.00																						
		Sent Commands Start / Stop <input type="text" value="###"/>																					
		Hist. Cont. to H2 Disch Ena Control <input type="button" value="On"/> H2C_Hydrde_In_Press_hth : <input type="text"/> H2C_Hydrde_In_Press_lth : <input type="text"/>																					
WARNING FLAGS 1 0000000000000000 LSB 00 FC Current too high 01 System current too high 02 System current too low 03 FC voltage too low 04 System voltage too low 06 H2 operation press too low 07 H2 operation press too high MSB		WARNING FLAGS 2 0000000000000000 LSB 00 H2 concentration too high 01 Ambient temp too low 02 Ambient temp too high 03 FC temperature too low 04 FC temperature too high 05 Fan speed 07 H2 Primary press too low MSB																					
ERROR FLAGS 1 0000000000000000 LSB 00 System voltage too low 01 System voltage too high 02 FC voltage too low 03 FC voltage too high 04 System current too low 05 System current too high 06 FC current too low 07 FC current too high MSB		ERROR FLAGS 3 0000000000000000 LSB 01 Fan speed 02 FC temp passed lower limit 03 FC temperature exceeded 04 Ambient temp passed lower limit 05 Ambient temp exceeded 06 H2 sensor failed 07 H2 concentration too high MSB																					
ERROR FLAGS 2 0000000000000000 LSB 00 Primary press too low 01 Primary press too high 02 Operating press too low 03 Operating press too high MSB		ERROR FLAGS 4 0000000000000000 LSB 04 Emergency stop 05 Emergency stop ext out off 06 Emergency stop overcurrent 05 Emergency Stop sensorwerte MSB																					

Figura 159. Panel para la gestión de la pila de hidrógeno (FC).

Dichas funcionalidades son las siguientes:

- **Monitorización del estado de funcionamiento de la pila de hidrógeno.** Mediante los indicadores situados a la izquierda del panel, dentro del recuadro *States* (Figura 160), pueden monitorizarse los diferentes estados de la pila de hidrógeno. Estos estados son los siguientes:
 - **Initializing.** Proceso de inicialización de la pila de hidrógeno. Durante este proceso, el *Front End Controller* del equipo comprueba que esté establecida la alimentación mediante fuente externa, activa la interfaz de comunicación CAN y realiza un chequeo interno.
 - **Off.** Estado de apagado. El equipo no tiene conectada la fuente de alimentación externa, y la comunicación no es posible.
 - **Standby.** Estado de reposo. El equipo está preparado para operar.
 - **Starting.** Proceso de arranque de la pila de hidrógeno. Durante este proceso, se activa el suministro de hidrógeno y de aire y se aplica tensión a los stacks para comenzar la reacción electroquímica.

- **Running.** Estado de marcha. El equipo está en funcionamiento y generando potencia a partir del hidrógeno.
- **Catalyst clean.** Proceso de purga de la pila de hidrógeno. Durante el estado de marcha, la pila realiza periódicamente este proceso.
- **Shutdown.** Proceso de apagado de la pila de hidrógeno. Durante este proceso, se cierra el suministro de hidrógeno al stack, se deja de generar potencia, y se refrigera el stack por aire si es necesario.
- **Error.** Estado de error de la pila de hidrógeno. El *Front End Controller* del equipo transiciona a este estado de seguridad en el cual se corta el suministro de hidrógeno y la generación de potencia cuando se detecta alguna condición que pueda ocasionar el deterioro del stack.
- **Monitorización de las magnitudes de la pila de hidrógeno.** Mediante los indicadores situados en la zona central superior del panel (Figura 161), pueden monitorizarse las siguientes magnitudes:
 - **System Voltage (V).** Tensión de la fuente de alimentación externa.
 - **System Current Self consumption (A).** Intensidad de autoconsumo del equipo cuando está en el estado de marcha generando electricidad a partir del hidrógeno.
 - **System Pressure (mbar).** Presión del hidrógeno en el stack.
 - **Stack Voltage (V).** Tensión del stack.
 - **Stack Current (A).** Intensidad del stack.
 - **Stack Temperature (°C).** Temperatura del stack.
 - **H2 Inlet Pressure (bar).** Presión del hidrógeno a la entrada de la pila.
 - **H2 Concentration (ppm).** Concentración de hidrógeno en el stack.
 - **Ambient Temperature (°C).** Temperatura ambiente.
 - **Fan Speed (rpm).** Cantidad de revoluciones por minuto del ventilador de la pila.
- **Monitorización de los registros de error y de warning de la pila de hidrógeno.** Mediante los indicadores situados en la parte inferior del panel (Figura 162), puede monitorizarse los registros con los flags de *warning* y de error de la pila de hidrógeno.
- **Envío de comandos a la pila de hidrógeno en el Modo de Funcionamiento Manual y en el modo D1.2 Diagnosis.** Mediante los controles situados a la derecha del panel (Figura 163), en el recuadro *Manual Func. Commands*, pueden enviarse a la pila de hidrógeno órdenes de arranque y de parada, así como la orden de rearme en el caso de que la pila se encuentre en el estado de error para hacer la transición al estado de reposo. Estos controles sólo están habilitados cuando la Microrred se encuentra en el Modo de Funcionamiento Manual, o en el modo D1.2 Diagnosis. Para el resto de modos estará deshabilitado.
- **Monitorización de comandos enviados a la pila de hidrógeno.** Mediante el indicador situado a la derecha del panel, en el recuadro *Sent Commands* (Figura 164), pueden monitorizarse las órdenes de arranque, parada y de rearme enviadas a la pila de hidrógeno en cualquiera de los modos y estados de operación de la Microrred. Se ha incluido este elemento en la interfaz de usuario del *First Level Control* para verificar que los comandos enviados a la pila de hidrógeno son correctos, tanto con propósitos de depuración del programa que implementa el *First Level Controller* como para la depuración de los algoritmos del *Second Level Controller*.
- **Habilitación y ajuste de los umbrales para el control por histéresis de la descarga de los tanques de hidruros.** Por razones de seguridad, la presión del hidrógeno a la entrada de la pila no debe superar nunca los 5 bares relativos. Para cuando la pila es alimentada desde los tanques de hidruros, se dispone de un control por histéresis que corta la inyección de agua caliente en los tanques cuando la presión de hidrógeno supera cierto valor umbral, designado *H2C_Hydride_In_Press_hth*, para de esta

manera reducir la desorción de hidrógeno y así evitar que la presión supere los 5 barg. Cuando la presión del hidrógeno cae por debajo de cierto valor umbral, designado *H2C_Hydride_In_Press_lth*, vuelve a activarse la inyección de agua caliente a los tanques de hidruros para incrementar la desorción del hidrógeno y aumentar la presión. Mediante los controles situados a la derecha del panel, en el recuadro *Hist. Cont. to H2 Disch* (Figura 165). puede habilitarse ó deshabilitarse este control por histéresis, así como modificar sus valores umbrales, que por defecto son 4.2 barg y 3.5 barg.

En el Modo de Funcionamiento Remoto, el arranque de la pila de hidrógeno se realiza de manera automática mediante una máquina de estados cuando se solicita el arranque de su convertidor DC/DC asociado. Por ello, en este panel no haya controles para el comando de la pila en el Modo de Funcionamiento Remoto.



Figura 160. Indicadores para la monitorización del estado de la pila de hidrógeno (FC).

System Voltage (V)	2.42
System Current Self cons (A)	2.43
System Pressure (mbar)	310.00
Stack Voltage (V)	22.73
Stack Current (A)	55.21
Stack Temperature (°C)	60.33
H2 Inlet Pressure (bar)	3.20
H2 Concentration (ppm)	96.00
Ambient Temperature (°C)	22.96
Fan Speed (rpm)	1829.00

Figura 161. Indicadores para la monitorización de las magnitudes de la pila de hidrógeno (FC).

WARNING FLAGS 1	0000000000000000	WARNING FLAGS 2	0000000000000000
LSB		LSB	
00 FC Current too high		00 H2 concentration too high	
01 System current too high		01 Ambient temp too low	
02 System current too low		02 Ambient temp too high	
03 FC voltage too low		03 FC temperature too low	
04 System voltage too low		04 FC temperature too high	
06 H2 operation press too low		05 Fan speed	
07 H2 operation press too high		07 H2 Primary press too low	
MSB		MSB	
ERROR FLAGS 1	0000000000000000	ERROR FLAGS 3	0000000000000000
LSB		LSB	
00 System voltage too low		01 Fan speed	
01 System voltage too high		02 FC temp passed lower limit	
02 FC voltage too low		03 FC temperature exceeded	
03 FC voltage too high		04 Ambient temp passed lower limit	
04 System current too low		05 Ambient temp exceeded	
05 System current too high		06 H2 sensor failed	
06 FC current too low		07 H2 concentration too high	
07 FC current too high		MSB	
MSB			
ERROR FLAGS 2	0000000000000000	ERROR FLAGS 4	0000000000000000
LSB		LSB	
00 Primary press too low		04 Emergency stop	
01 Primary press too high		05 Emergency stop ext out off	
02 Operating press too low		06 Emergency stop overcurrent	
03 Operating press too high		05 Emergency Stop sensorwerte	
MSB		MSB	

Figura 162. Indicadores para la monitorización de los registros con los flags de aviso y de error de la pila de hidrógeno (FC).

.42

.43

.00

.73

.21

--

Manual Func. Commands

start / stop

Rearm

Figura 163. Controles para el envío de comandos a la pila de hidrógeno (FC) en el Modo de Funcionamiento Manual y en el modo D1.2 Diagnosis.


Sent Commands


start / stop

####

Figura 164. Indicador para la monitorización de los comandos enviados a la pila de hidrógeno (FC).

Hist. Cont. to H2 Disch

Ena Control 

H2C_Hydride_In_Press_hth: 


H2C_Hydride_In_Press_lth: 

Figura 165. Controles para la habilitación/deshabilitación y ajuste de umbrales del control por histéresis de la presión del hidrógeno a la entrada de la pila.

7.2.11 Panel Gestión DC/DC H2 Fuel Cell

A través de esta pantalla, el usuario tiene acceso a todas las funcionalidades relativas al manejo del convertidor DC/DC de Win Inertia asociado a la pila de hidrógeno, designado CFC (*Converter - Fuel Cell*). Su apariencia es la que se muestra en la Figura 166.

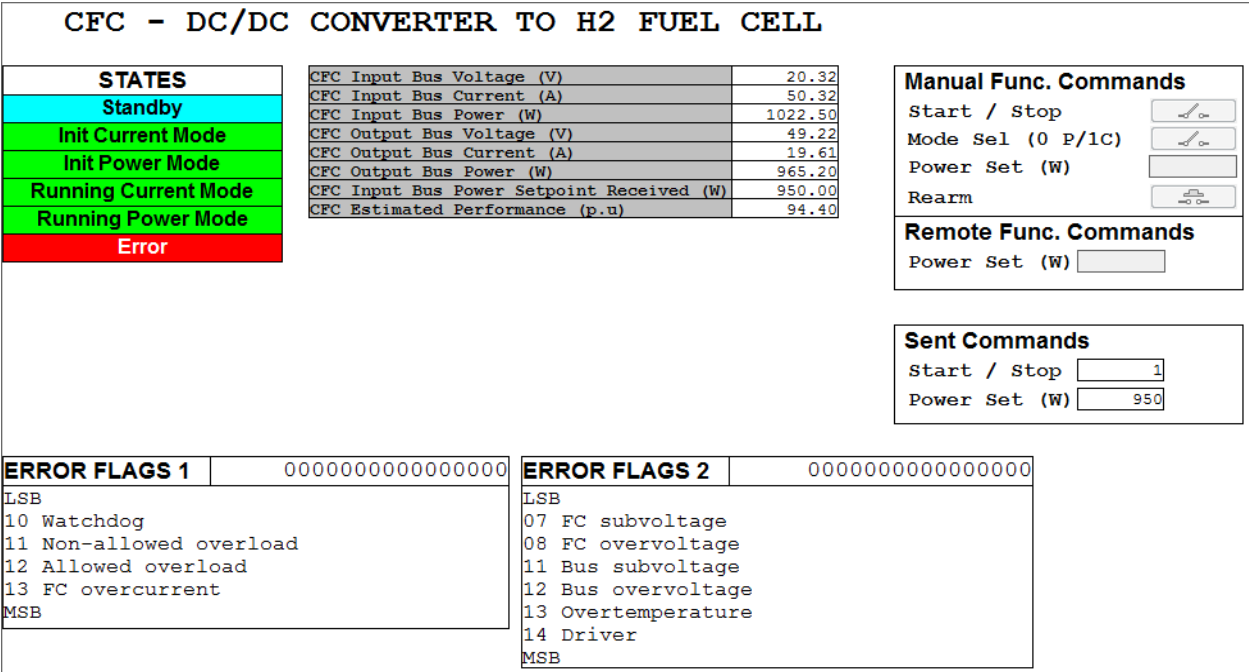


Figura 166. Panel para la gestión del convertidor DC/DC asociado a la pila de hidrógeno (CPH).

Dichas funcionalidades son las siguientes:

- **Monitorización del estado de funcionamiento del convertidor.** Mediante los indicadores situados a la izquierda del panel, dentro del recuadro *States* (Figura 167), pueden monitorizarse los diferentes estados del convertidor. Estos estados son los siguientes:
 - *Standby*. Estado de reposo.
 - *Init Current Mode*. Arranque para funcionamiento en Modo Corriente.
 - *Init Power Mode*. Arranque para funcionamiento en Modo Potencia.
 - *Running Current Mode*. Funcionamiento en Modo Corriente. El convertidor opera regulando la intensidad en el bus de salida según la consigna que se le ha enviado.
 - *Running Power Mode*. Funcionamiento en Modo Potencia. El convertidor opera regulando la potencia en el bus de salida según la consigna que se le ha enviado.
- **Monitorización de las magnitudes del convertidor.** Mediante los indicadores situados en la zona central superior del panel (Figura 168), pueden monitorizarse las siguientes magnitudes:
 - *Input Bus Voltage (V)*. Tensión en el bus del convertidor conectado a la pila de hidrógeno.
 - *Input Bus Current (A)*. Intensidad en el bus del convertidor conectado a la pila de hidrógeno.
 - *Input Bus Power (W)*. Potencia en el bus del convertidor conectado a la pila de hidrógeno.
 - *Output Bus Voltage (V)*. Tensión en el bus del convertidor conectado al bus principal de la Microrred.
 - *Output Bus Current (A)*. Intensidad en el bus del convertidor conectado al bus principal de la Microrred.

- **Output Bus Power (W).** Potencia en el bus del convertidor conectado al bus principal de la Microrred.
- **Input Bus Power Setpoint Received (W).** Consigna de potencia recibida por el convertidor.
- **Estimated Performance (p.u).** Rendimiento estimado del convertidor.
- **Monitorización de los registros de error del convertidor.** Mediante los indicadores situados en la zona inferior del panel, en los recuadros *Error Flags* (Figura 169), puede monitorizarse la activación de los flags de error del convertidor.
- **Envío de comandos al convertidor en el Modo de Funcionamiento Manual y en el modo D1.2 Diagnosis.** Mediante los controles situados a la derecha del panel, en el recuadro *Manual Func. Commands* (Figura 170), pueden enviarse al convertidor órdenes de arranque, parada y rearme, seleccionar entre el funcionamiento en Modo Corriente o en Modo Potencia, y enviarle valores de consigna, en el Modo de Funcionamiento Manual o en el modo D1.2 Diagnosis. Estos controles sólo están habilitados cuando la Microrred se encuentra en dichos modos de operación, estando deshabilitados para el resto.
- **Arranque, apagado y envío de consignas de potencia al sistema Fuel Cell-DC/DC en el Modo de Funcionamiento Remoto.** Dentro del Modo de Funcionamiento Remoto, se dispone de una máquina de estados mediante la cual se realizan de manera controlada las secuencias de arranque y de apagado del sistema formado por la pila de hidrógeno y su convertidor DC/DC asociado, en función de la consigna de potencia introducida por el usuario mediante el control situado dentro del recuadro *Remote Func. Commands* (Figura 171).

Cuando se envía al convertidor una consigna de potencia por encima de cierto valor umbral, se realiza la siguiente secuencia de arranque:

1. Se abren las válvulas del circuito de agua para la inyección de agua caliente en los tanques de hidruros, para desorber hidrógeno.
2. Se abren las válvulas del circuito de hidrógeno para el paso del hidrógeno desde los tanques de hidruros hacia la pila de hidrógeno.
3. Cuando la presión en el circuito de hidrógeno supera los 2 bares, valor mínimo para que la pila pueda operar, se envía a esta una orden de arranque.
4. Una vez la pila se encuentra en estado de marcha, se envía una orden de arranque al convertidor.
5. Una vez el convertidor se encuentra en estado de funcionamiento en Modo Potencia, se le envía la consigna de potencia introducida por el usuario, a un ratio de 100 W por segundo.

Cuando se envía al convertidor una consigna de potencia por debajo de cierto umbral, se realiza la siguiente secuencia de parada:

1. Se envía al convertidor una consigna de potencia igual a cero, con un ratio de -100 W por segundo.
2. Una vez la potencia a la salida del convertidor ha descendido por debajo de cierto valor umbral por debajo del cual se considera cero, se le envía una orden de parada.
3. Una vez el convertidor se encuentra en estado de reposo, se envía una orden de parada a la pila de hidrógeno.
4. Una vez la pila de hidrógeno se encuentra en estado de reposo, se cierran las válvulas del circuito de hidrógeno que permiten el paso del hidrógeno desde los tanques de hidruros hacia la pila.
5. Se cierran las válvulas del circuito de agua para cortar la inyección de agua caliente en los tanques de hidruros.

El valor umbral para la consigna de potencia es de 50 W. Para potencias por debajo de dicho valor, la pila de hidrógeno puede deteriorarse.

- **Monitorización de comandos y consignas enviados al convertidor.** Mediante los indicadores situados a la derecha del panel, en el recuadro *Sent Commands* (Figura 171), pueden monitorizarse los comandos y las consignas de potencia enviadas al convertidor en cualquiera de los modos y estados de operación de la Microrred. Se ha incluido este elemento en la interfaz de usuario del *First Level Control* para verificar que los comandos enviados al convertidor son correctos, tanto con propósitos de depuración del programa que implementa el *First Level Controller* como para la depuración de los algoritmos de control del *Second Level Controller*.

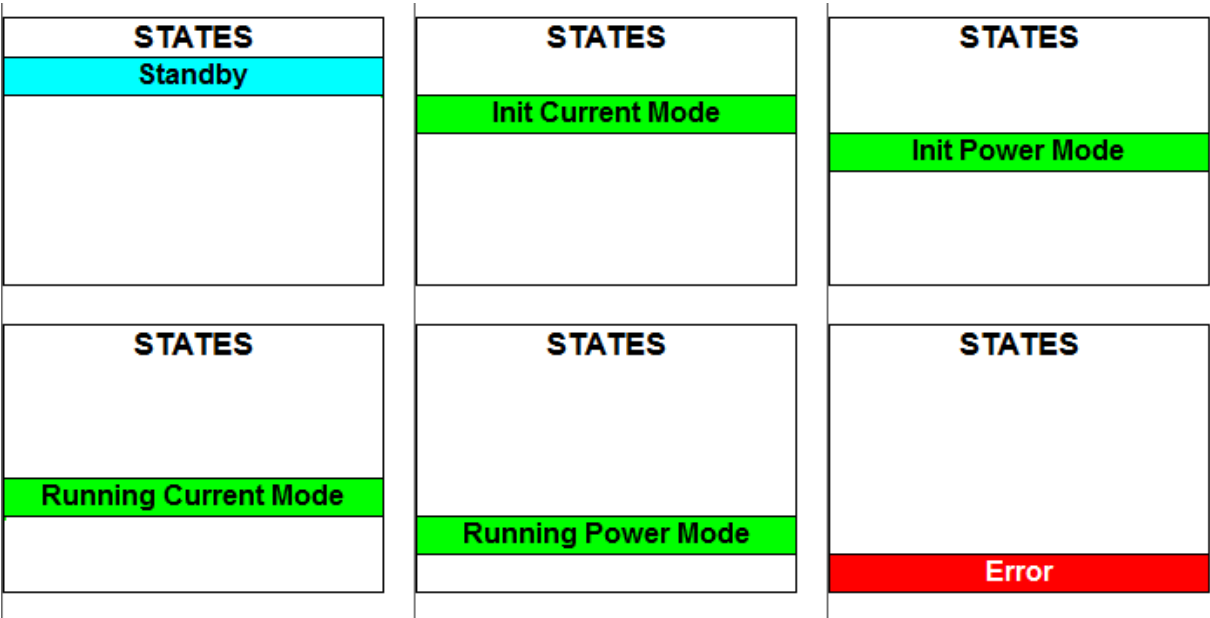


Figura 167. Indicadores para la monitorización del estado de funcionamiento del convertidor DC/DC asociado a la pila de hidrógeno (CFC).

CFC Input Bus Voltage (V)	20.32
CFC Input Bus Current (A)	50.32
CFC Input Bus Power (W)	1022.50
CFC Output Bus Voltage (V)	49.22
CFC Output Bus Current (A)	19.61
CFC Output Bus Power (W)	965.20
CFC Input Bus Power Setpoint Received (W)	950.00
CFC Estimated Performance (p.u)	94.40

Figura 168. Indicadores para la monitorización de las magnitudes del convertidor DC/DC asociado a la pila de hidrogeno (CFC).

ERROR FLAGS 1	0000000000000000	ERROR FLAGS 2	0000000000000000
LSB		LSB	
10 Watchdog		07 FC subvoltage	
11 Non-allowed overload		08 FC overvoltage	
12 Allowed overload		11 Bus subvoltage	
13 FC overcurrent		12 Bus overvoltage	
MSB		13 Overtemperature	
		14 Driver	
		MSB	

Figura 169. Indicadores para la monitorización de los registros con los flags de error del convertidor DC/DC asociado a la pila de hidrógeno (CFC).

Manual Func. Commands

Start / Stop

Mode Sel (0 P/1C)

Power Set (W)

Rearm

On

On

On

Figura 170. Controles para el envío de comandos y consignas de potencia al convertidor DC/DC asociado a la pila de hidrógeno (CFC) en el Modo de Funcionamiento Manual y en el modo D1.2 Diagnosis.

Remote Func. Commands

Power Set (W)

Figura 171. Control para el envío de consignas de potencia al sistema *Fuel Cell* - *DC/DC* en el Modo de Funcionamiento Remoto.

Sent Commands

Start / Stop

Power Set (W)

1

950

Figura 172. Indicadores para la monitorización de los comandos y consignas enviados al convertidor DC/DC asociado la pila de hidrógeno (CFC).

7.2.12 Panel Gestión Fuente de Alimentación Programable

A través de esta pantalla, el usuario tiene acceso a todas las funcionalidades relativas al manejo de la fuente de alimentación programable DC Powerbox LBX 60-100, designada PS (*Power Supply*). Su apariencia es la que se muestra en la Figura 173.

PS - PROGRAMMABLE POWER SUPPLY	
PS Output Bus Voltage (V)	49.55
PS Output Bus Current (A)	20.17
PS Output Bus Power (W)	999.42
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> Manual Func. Commands Out Voltage Set (V) <input style="width: 80px;" type="text"/> Out Current Set (A) <input style="width: 80px;" type="text"/> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> Remote Func. Commands Out Voltage Set (V) <input style="width: 80px;" type="text"/> Out Current Set (A) <input style="width: 80px;" type="text"/> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> Sent Commands Out Voltage Set (V) <input style="width: 80px; border: 1px solid black;" type="text" value="60"/> Out Current Set (A) <input style="width: 80px; border: 1px solid black;" type="text" value="20"/> </div>	

Figura 173. Panel para la gestión de la fuente de alimentación programable (PS).

Dichas funcionalidades son las siguientes:

- **Monitorización de las magnitudes de la fuente de alimentación programable PS.** Mediante los indicadores situados en la parte izquierda del panel (Figura 174), pueden monitorizarse las siguientes magnitudes:
 - *PS Output Bus Voltage (V)*. Tensión en el bus de salida de la fuente programable.
 - *PS Output Bus Current (A)*. Intensidad en el bus de salida de la fuente programable, inyectada al bus principal de la Microrred.
 - *PS Output Bus Power (W)*. Potencia en el bus de salida de la fuente programable, inyectada al bus principal de la Microrred.
- **Envío de consignas de tensión e intensidad en el Modo de Funcionamiento Manual y en el modo D1.2 Diagnosis.** Mediante los controles situados a la derecha del panel, en el recuadro *Manual Func. Commands* (Figura 175), pueden enviarse a la fuente consignas de tensión y de intensidad en el Modo de Funcionamiento Manual o en el modo D1.2 Diagnosis. Para otros modos y estados de operación de la Microrred, estos controles se deshabilitan.
- **Envío de consignas de tensión e intensidad en el Modo de Funcionamiento Remoto.** De manera análoga al envío de consignas en el Modo de Funcionamiento Manual, mediante los controles situados a la derecha del panel, en el recuadro *Remote Func. Commands* (Figura 176), pueden enviarse a la fuente consignas de tensión y de intensidad en el Modo de Funcionamiento Remoto. Para otros modos y estados de operación de la Microrred, estos controles se deshabilitan.
- **Monitorización de comandos enviados a la fuente de alimentación programable.** Mediante los indicadores situados a la derecha del panel, en el recuadro *Sent Commands* (Figura 177), pueden monitorizarse las consignas de tensión e intensidad enviadas a la fuente de alimentación programable en cualquiera de los modos y estados de operación de la Microrred. Se ha incluido este elemento en la interfaz de usuario del *First Level Controller* para verificar que los comandos enviados a la fuente programable son correctos, tanto con propósitos de depuración del programa que implementa el *First Level Control* como para la depuración de los algoritmos de control del *Second Level Controller*.

El encendido y apagado de la fuente de alimentación programable no puede hacerse de manera remota. Debe

hacerlo el usuario accionando físicamente el interruptor del equipo, lo cual se solicita lo realice durante la secuencia de arranque de la Microrred mediante un mensaje en la pantalla para la selección de modos de operación.

PS PROGRAMABLE	
PS Output Bus Voltage (V)	49.55
PS Output Bus Current (A)	20.17
PS Output Bus Power (W)	999.42

Figura 174. Indicadores para la monitorización de las magnitudes de la fuente de alimentación programable (PS).

MANUAL

Manual Func. Commands

Out Voltage Set (V)

Out Current Set (A)

Figura 175. Controles para el envío de consignas de tensión e intensidad a la fuente programable en el Modo de Funcionamiento Manual y en el modo D1.2 Diagnosis.

Remote Func. Commands

Out Voltage Set (V)

Out Current Set (A)

Figura 176. Controles para el envío de consignas de tensión e intensidad a la fuente programable en el Modo de Funcionamiento Remoto.

Sent Commands

Out Voltage Set (V)

Out Current Set (A)

Figura 177. Indicadores para la monitorización de las consignas de tensión e intensidad enviadas a la fuente de alimentación programable PS.

7.2.13 Panel Gestión Carga Programable

A través de esta pantalla, el usuario tiene acceso a todas las funcionalidades relativas al manejo de la carga programable DC Amrel PLA2.5K-60-1000, designada DCL (*DC Load*). Su apariencia es la que se muestra en la Figura 178.

DCL - PROGRAMMABLE DC LOAD	
DCL Input Bus Voltage (V)	48.75
DCL Input Bus Current (A)	5.12
DCL Input Bus Power (W)	249.6
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> Manual Func. Commands Input Power Set (W) <input style="width: 80px;" type="text"/> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> Remote Func. Commands Input Power Set (W) <input style="width: 80px;" type="text"/> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> Sent Commands Input Power Set (W) <input style="width: 80px; border: 1px solid black;" type="text" value="250"/> </div>	

Figura 178. Panel para la gestión de la carga programable (DCL).

Dichas funcionalidades son las siguientes:

- **Monitorización de las magnitudes de la carga programable DCL.** Mediante los indicadores situados en la parte izquierda del panel (Figura 179), pueden monitorizarse las siguientes magnitudes:
 - *DCL Input Bus Voltage (V)*. Tensión en el bus de entrada de la carga programable.
 - *DCL Input Bus Current (A)*. Intensidad en el bus de entrada de la carga programable.
 - *DCL Input Bus Power (W)*. Potencia en el bus de entrada de la carga programable, extraída del bus principal de la Microrred.
- **Envío de consignas de potencia en el Modo de Funcionamiento Manual y en el modo D1.2 Diagnosis.** Mediante el control situado a la derecha del panel, en el recuadro *Manual Func. Commands* (Figura 180), pueden enviarse a la fuente consignas de potencia en el Modo de Funcionamiento Manual o en el modo D1.2 Diagnosis. Para otros modos y estados de operación de la Microrred, este control se deshabilita.
- **Envío de consignas de potencia en el Modo de Funcionamiento Remoto.** Mediante el control situado a la derecha del panel, en el recuadro *Remote Func. Commands* (Figura 181), pueden enviarse a la fuente consignas de potencia en el Modo de Funcionamiento Remoto. Para otros modos y estados de operación de la Microrred, este control se deshabilita.
- **Monitorización de comandos enviados a la carga programable.** Mediante el indicador situado a la derecha del panel, en el recuadro *Sent Commands* (Figura 182), puede monitorizarse la consigna de potencia enviada a la carga programable en cualquiera de los modos y estados de operación de la Microrred. Se ha incluido este elemento en la interfaz de usuario del *First Level Controller* para verificar que los comandos enviados a la carga programable son correctos, tanto con propósitos de depuración del programa que implementa el *First Level Control* como para la depuración de los algoritmos de control del *Second Level Controller*.

DCL PROGRAMABLE	
DCL Input Bus Voltage (V)	48.75
DCL Input Bus Current (A)	5.12
DCL Input Bus Power (W)	249.6

Figura 179. Indicadores para la monitorización de las magnitudes de la carga programable (DCL).

101215

Manual Func. Commands

Input Power Set (W)

Figura 180. Control para el envío de consignas de potencia a la carga programable en el Modo de Funcionamiento Manual y en el modo D1.2 Diagnosis.

Remote Func. Commands

Input Power Set (W)

Figura 181. Control para el envío de consignas de potencia a la carga programable en el Modo de Funcionamiento Remoto.

Sent Commands

Input Power Set (W)

Figura 182. Indicador para la monitorización de la consigna de potencia enviada a la carga programable.

7.2.14 Panel Gestión Circuitos de H2 y de Agua

A través de esta pantalla, el usuario tiene acceso a todas las funcionalidades relativas al circuito de hidrógeno y al circuito de agua para la calefacción y refrigeración de los tanques de hidruros. Su apariencia es la que se muestra en la Figura 183.

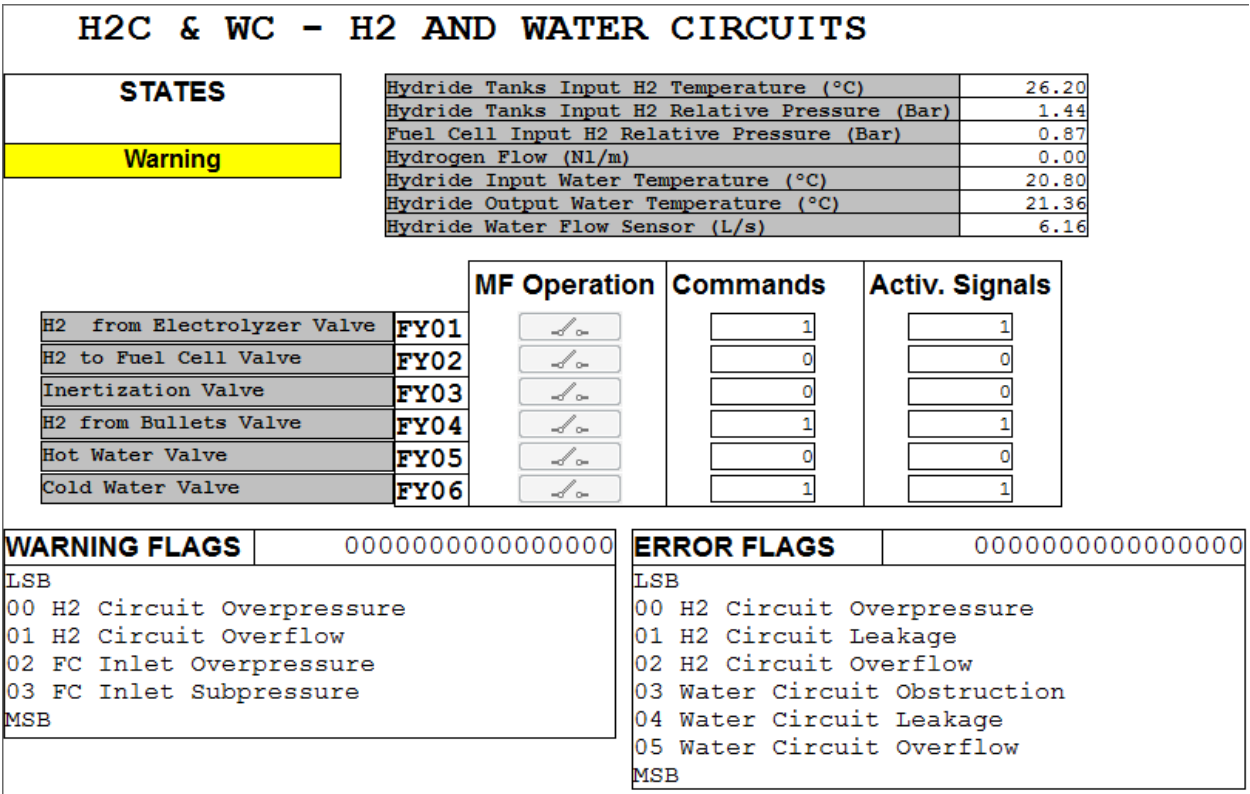


Figura 183. Panel para la gestión de los circuitos de hidrógeno y de agua.

Dichas funcionalidades son la siguientes:

- **Monitorización de avisos y alarmas por presión, fugas, obstrucciones o sobrecaudales en los circuitos.** Si se detecta sobrepresión, fugas ó caudales anormalmente elevados en el circuito de hidrógeno, se activarán las indicaciones de aviso ó de error contenidas en el recuadro *states* (Figura 184), y se pondrán a uno los flags correspondientes (Figura 185). De manera análoga, ocurrirá lo mismo si se detectan obstrucciones, fugas o caudales anormalmente elevados en el circuito de agua.
- **Monitorización de las magnitudes de los circuitos de agua y de hidrógeno.** Mediante los indicadores situados en la zona central superior del panel (Figura 186), pueden monitorizarse las siguientes magnitudes:
 - *Hydride Tanks Input H2 Temperature (°C)*. Temperatura del hidrógeno a la entrada de los tanques de hidruros.
 - *Hydride Tanks Input H2 Relative Pressure (Barg)*. Presión relativa del hidrógeno a la entrada de los tanques de hidruros.
 - *Fuel Cell Input H2 Relative Pressure (Barg)*. Presión relativa del hidrógeno a la entrada de la pila de hidrógeno.
 - *Hydrogen Flow (Nl/m)*. Caudal de hidrógeno hacia la pila de hidrógeno.
 - *Hydride Input Water Temperature (°C)*. Temperatura del agua inyectada a los tanques de hidruros.
 - *Hydride Output Water Temperature (°C)*. Temperatura del agua retornada de los tanques de

hidruros.

- *Hydride Water Flow Sensor (L/s)*. Caudal de agua inyectada a los tanques de hidruros.
- **Comando de las válvulas de los circuitos de hidrógeno y de agua en el Modo de Funcionamiento Manual y en el modo D1.2 Diagnosis.** Mediante los controles situados en la zona central del panel (Figura 187) pueden enviarse órdenes de cierre y de apertura a todas las electroválvulas de los circuitos de hidrógeno y de agua.

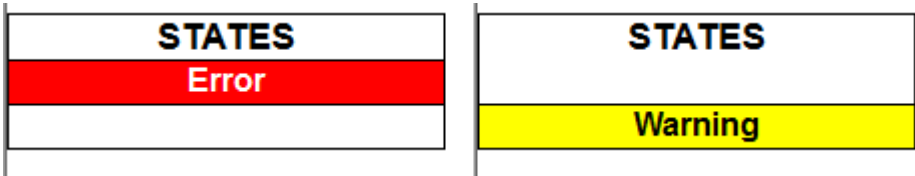


Figura 184. Indicadores de error y de aviso para los circuitos de hidrógeno y de agua.

WARNING FLAGS	0000000000000000	ERROR FLAGS	0000000000000000
LSB		LSB	
00 H2 Circuit Overpressure		00 H2 Circuit Overpressure	
01 H2 Circuit Overflow		01 H2 Circuit Leakage	
02 FC Inlet Overpressure		02 H2 Circuit Overflow	
03 FC Inlet Subpressure		03 Water Circuit Obstruction	
MSB		04 Water Circuit Leakage	
		05 Water Circuit Overflow	
		MSB	

Figura 185. Flags para errores y avisos de los circuitos de hidrógeno y de agua.

Hydride Tanks Input H2 Temperature (°C)	26.20
Hydride Tanks Input H2 Relative Pressure (Bar)	1.44
Fuel Cell Input H2 Relative Pressure (Bar)	0.87
Hydrogen Flow (Nl/m)	0.00
Hydride Input Water Temperature (°C)	20.80
Hydride Output Water Temperature (°C)	21.36
Hydride Water Flow Sensor (L/s)	6.16

Figura 186. Indicadores para la monitorización de las magnitudes de los circuitos de hidrógeno y de agua.

		MF Operation	Commands	Activ. Signals
H2 from Electrolyzer Valve	FY01		1	1
H2 to Fuel Cell Valve	FY02		0	0
Inertization Valve	FY03		0	0
H2 from Bullets Valve	FY04		1	1
Hot Water Valve	FY05		0	0
Cold Water Valve	FY06		1	1

Figura 187. Controles para el comando de las electroválvulas de los circuitos de hidrógeno y de agua.

7.3 ANEXO 3: Parámetros de ajuste del *First Level Controller*

7.3.1 Parámetros de ajuste para el stack de baterías de plomo (PB)

El stack de baterías de plomo tiene unos límites de tensión máxima y mínima, que en caso de ser rebasados pueden ocasionarle daños permanentes.

Se tiene también un límite mínimo para el SOC, que en caso de ser rebasado produciría una importante degradación de la batería.

Por otro lado, se tiene también un límite máximo para el SOC, debido a que la batería debe disponer siempre de capacidad suficiente para absorber los excesos de energía transitorios que pueden producirse en el bus principal de la Microrred.

En el proyecto de Unity Pro en el que se ha desarrollado el programa del *First Level Controller*, a través de la ventana Editor de Datos accesible mediante el explorador de proyectos, se tiene acceso a las variables que se han definido para los límites de tensión y de SOC del stack de baterías de plomo (Figura 188). Dichas variables son las siguientes:

- ***PB_TH.Stack_Volt_hwth_r***. Límite superior de la tensión del stack para aviso. Si la tensión del stack supera dicho valor, se generan avisos en la Interfaz de Usuario del FLC. Por defecto, su valor es de 52.0 V.
- ***PB_TH.Stack_Volt_lwth_r***. Límite inferior de la tensión del stack para aviso. Si la tensión del stack supera dicho valor, se generan avisos en la Interfaz de Usuario del FLC. Por defecto, su valor es de 46.0 V.
- ***PB_TH.Stack_Volt_heth_r***. Límite superior de la tensión del stack para error. La superación de este valor de tensión es una condición de error para la planta. Si la tensión del stack supera dicho valor, la Microrred transiciona al estado de emergencia. Por defecto, su valor es de 56.0 V.
- ***PB_TH.Stack_Volt_leth_r***. Límite inferior de la tensión del stack para error. La superación de este valor de tensión es una condición de error para la planta. Si la tensión del stack supera dicho valor, la Microrred transiciona al estado de emergencia. Por defecto, su valor es de 44.0 V.
- ***PB_TH.SOC_hwth_r***. Límite superior del SOC para aviso. Si el SOC del stack supera dicho valor, se generan avisos en la Interfaz de Usuario del FLC. Por defecto, su valor es un 70.0 %.
- ***PB_TH.SOC_lwth_r***. Límite inferior del SOC para aviso. Si el SOC del stack supera dicho valor, se generan avisos en la Interfaz de Usuario del FLC. Por defecto, su valor es un 40.0 %.
- ***PB_TH.SOC_heth_r***. Límite superior del SOC para error. La superación de este valor de SOC es una condición de error para la planta. Si el SOC del stack supera dicho valor, la Microrred transiciona al estado de emergencia. Por defecto, su valor es de un 80 %.
- ***PB_TH.SOC_leth_r***. Límite inferior del SOC para error. La superación de este valor de SOC es una condición de error para la planta. Si el SOC del stack supera dicho valor, la Microrred transiciona al estado de emergencia. Por defecto, su valor es de un 30 %.

Variable	Lead_TH	Value	Description
Stack_Volt_hwth_r	REAL	52.0	Stack voltage high warning threshold
Stack_Volt_lwth_r	REAL	46.0	Stack voltage low warning threshold
Stack_Volt_heth_r	REAL	56.0	Stack voltage high error threshold
Stack_Volt_leth_r	REAL	44.0	Stack voltage low error threshold
SOC_hwth_r	REAL	70.0	SOC high warning threshold
SOC_lwth_r	REAL	40.0	SOC low warning threshold
SOC_heth_r	REAL	80.0	SOC high error threshold
SOC_leth_r	REAL	30.0	SOC low error threshold
PB_V_r	REAL		Lead Battery Stack Estimated Voltage (V).

Figura 188. Variables para los límites de tensión y de SOC para el stack de baterías de plomo (PB).

7.3.2 Parámetros de ajuste para el stack de baterías de litio (LI)

El stack de baterías de litio tiene unos límites para la tensión de celda máxima y mínima, que en caso de ser rebasados pueden ocasionar daños permanentes.

Se tiene también un límite mínimo para el SOC, que en caso de ser rebasado produciría una importante degradación de la batería.

Por otro lado, por razones de seguridad, se ha decidido incluir también un límite máximo para el SOC.

En el proyecto de Unity Pro en el que se ha desarrollado el programa del *First Level Controller*, a través de la ventana Editor de Datos accesible mediante el explorador de proyectos, se tiene acceso a las variables que se han definido para los límites de tensión y de SOC del stack de baterías de litio (Figura 189). Dichas variables son las siguientes:

- ***Li_TH.Cell_Volt_hwth_r***. Límite superior de la tensión de celda para aviso. Si la tensión de celda supera dicho valor, se generan avisos en la Interfaz de Usuario del FLC. Por defecto, su valor es de 4.5 V.
- ***Li_TH.Cell_Volt_lwth_r***. Límite inferior de la tensión de celda para aviso. Si la tensión de celda supera dicho valor, se generan avisos en la Interfaz de Usuario del FLC. Por defecto, su valor es de 2.7 V.
- ***Li_TH.Cell_Volt_heth_r***. Límite superior de la tensión de celda para error. La superación de este valor de tensión es una condición de error para la planta. Si la tensión de celda supera dicho valor, la Microrred transiciona al estado de emergencia. Por defecto, su valor es de 4.5 V.
- ***Li_TH.Cell_Volt_leth_r***. Límite inferior de la tensión de celda para error. La superación de este valor de tensión es una condición de error para la planta. Si la tensión de celda supera dicho valor, la Microrred transiciona al estado de emergencia. Por defecto, su valor es de 2.5 V.
- ***Li_TH.SOC_hwth_r***. Límite superior del SOC para aviso. Si el SOC del stack supera dicho valor, se generan avisos en la Interfaz de Usuario del FLC. Por defecto, su valor es un 90.0 %.
- ***Li_TH.SOC_lwth_r***. Límite inferior del SOC para aviso. Si el SOC del stack supera dicho valor, se generan avisos en la Interfaz de Usuario del FLC. Por defecto, su valor es un 45.0 %.
- ***Li_TH.SOC_heth_r***. Límite superior del SOC para error. La superación de este valor de SOC es una condición de error para la planta. Si el SOC del stack supera dicho valor, la Microrred transiciona al estado de emergencia. Por defecto, su valor es de un 95 %.
- ***Li_TH.SOC_leth_r***. Límite inferior del SOC para error. La superación de este valor de SOC es una condición de error para la planta. Si el SOC del stack supera dicho valor, la Microrred transiciona al estado de emergencia. Por defecto, su valor es de un 40 %.

Li_TH	Lithium_TH			Lithium Battery Stack Thresholds.
Cell_Volt_hwth_r	REAL	4.5		Cell voltage high warning threshold
Cell_Volt_lwth_r	REAL	2.7		Cell voltage low warning threshold
Cell_Volt_heth_r	REAL	4.5		Cell voltage high error threshold
Cell_Volt_leth_r	REAL	2.5		Cell voltage low error threshold
SOC_hwth_r	REAL	90.0		SOC high warning threshold
SOC_lwth_r	REAL	45.0		SOC low warning threshold
SOC_heth_r	REAL	95.0		SOC high error threshold
SOC_leth_r	REAL	40.0		SOC low error threshold
MB_CLI_Error_n	BOOL			Modbus CLI Communication Error.
MB_E7_Error_n	BOOL			Modbus E7 Communication Error.

Figura 189. Variables para los límites de tensión y de SOC para el stack de baterías de litio (LI).

7.3.3 Parámetros de ajuste para el convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (CLI)

El convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio dispone de un conjunto de variables denominadas **parámetros de protección**, que contienen los valores límite para las tensiones, intensidades, potencias y temperaturas del equipo. Si se superan dichos valores, el convertidor entra en estado de error. Los valores de los parámetros de protección son cargados en el convertidor vía Modbus durante la secuencia de arranque de la Microrred.

En el proyecto de Unity Pro en el que se ha desarrollado el programa del *First Level Controller*, a través de la ventana Editor de Datos accesible mediante el explorador de proyectos, se tiene acceso a un array de valores enteros, denominado *CLI_Prot_Pars_ai* (Figura 190), que se ha definido para almacenar los valores de los parámetros de protección del convertidor. Los valores que contiene son los siguientes:

- **CLI_Prot_Pars_ai[1]**. Límite mínimo para la tensión en el bus conectado al stack de baterías de litio. Su rango es desde 41 V hasta 48 V. Su valor por defecto es de 40 V, fijado por el desarrollador del equipo tras las pruebas de integración.
- **CLI_Prot_Pars_ai[2]**. Límite máximo para la tensión en el bus conectado al stack de baterías de litio. Su rango es desde 48 V hasta 57 V. Su valor por defecto es de 60 V, fijado por el desarrollador del equipo tras las pruebas de integración.
- **CLI_Prot_Pars_ai[3]**. Límite mínimo para la tensión en el bus conectado al bus principal de la Microrred. Su rango es desde 41 V hasta 48 V. Su valor por defecto es de 40 V, fijado por el desarrollador del equipo tras las pruebas de integración.
- **CLI_Prot_Pars_ai[4]**. Límite máximo para la tensión en el bus conectado al bus principal de la Microrred. Su rango es desde 48 V hasta 57 V. Su valor por defecto es de 60 V, fijado por el desarrollador del equipo tras las pruebas de integración.
- **CLI_Prot_Pars_ai[5]**. Límite mínimo para la intensidad en el bus conectado al stack de baterías de litio. Su rango es desde -70 A hasta 0 A. Su valor por defecto es de -70 A, fijado por el desarrollador del equipo tras las pruebas de integración.
- **CLI_Prot_Pars_ai[6]**. Límite máximo para la intensidad en el bus conectado al stack de baterías de litio. Su rango es desde 0 A hasta 70 A. Su valor por defecto es de 70 A, fijado por el desarrollador del equipo tras las pruebas de integración.
- **CLI_Prot_Pars_ai[7]**. Límite mínimo para la intensidad en el bus conectado al bus principal de la Microrred. Su rango es desde -70 A hasta 0 A. Su valor por defecto es de -70 A, fijado por el desarrollador del equipo tras las pruebas de integración.
- **CLI_Prot_Pars_ai[8]**. Límite máximo para la intensidad en el bus conectado al bus principal de la Microrred. Su rango es desde 0 A hasta 70 A. Su valor por defecto es de 70 A, fijado por el desarrollador del equipo tras las pruebas de integración.
- **CLI_Prot_Pars_ai[9]**. Límite mínimo para la potencia en el bus conectado al stack de baterías de litio. Su rango es desde -3000 W hasta 0 W. Su valor por defecto es de -3200 W, fijado por el desarrollador del equipo tras las pruebas de integración.

- **CLI_Prot_Pars_ai[10]**. Límite máximo para la potencia en el bus conectado al stack de baterías de litio. Su rango es desde 0 W hasta 3000 W. Su valor por defecto es de 3200 W, fijado por el desarrollador del equipo tras las pruebas de integración.
- **CLI_Prot_Pars_ai[11]**. Límite mínimo para la potencia en el bus conectado al bus principal de la Microrred. Su rango es desde -3000 W hasta 0 W. Su valor por defecto es de -3200 W, fijado por el desarrollador del equipo tras las pruebas de integración.
- **CLI_Prot_Pars_ai[12]**. Límite máximo para la tensión en el bus conectado al bus principal de la Microrred. Su rango es desde 0 W hasta 3000 W. Su valor por defecto es de 3200 W, fijado por el desarrollador del equipo tras las pruebas de integración.
- **CLI_Prot_Pars_ai[13]**. Límite máximo para la temperatura de las bobinas. Su rango es desde 30 °C hasta 100°C. Su valor por defecto es de 80 °C, fijado por el desarrollador del equipo tras las pruebas de integración.
- **CLI_Prot_Pars_ai[14]**. Límite máximo para la temperatura de los IGBTs. Su rango es desde 30 °C hasta 100 °C. Su valor por defecto es de 80 °C, fijado por el desarrollador del equipo tras las pruebas de integración.

CLI_Prot_Pars_ai	ARRAY[1..1...			DC/DC Conv. to Lithium B.S. - Protection Parameters.
CLI_Prot_Pars_ai[1]	INT	40		Minimum Limit of Battery Voltage (V) [41V ... 48V]
CLI_Prot_Pars_ai[2]	INT	60		Maximum Limit of Battery Voltage (V) [48V ... 57V]
CLI_Prot_Pars_ai[3]	INT	40		Minimum Limit of Bus Voltage (V) [41V ... 48V]
CLI_Prot_Pars_ai[4]	INT	60		Maximum Limit of Bus Voltage (V) [48V ... 57V]
CLI_Prot_Pars_ai[5]	INT	-70		Minimum Limit of Battery Current (A) [-70A ... 0A]
CLI_Prot_Pars_ai[6]	INT	70		Maximum Limit of Battery Current (A) [0A ... 70A]
CLI_Prot_Pars_ai[7]	INT	-70		Minimum Limit of Bus Current (A) [-70A ... 0A]
CLI_Prot_Pars_ai[8]	INT	70		Maximum Limit of Bus Current (A) [0A ... 70A]
CLI_Prot_Pars_ai[9]	INT	-3200		Minimum Limit of Battery Power (W) [-3000W ... 0W]
CLI_Prot_Pars_ai[10]	INT	3200		Maximum Limit of Battery Power (W) [0W ... 3000W]
CLI_Prot_Pars_ai[11]	INT	-3200		Minimum Limit of Bus Power (W) [-3000W ... 0W]
CLI_Prot_Pars_ai[12]	INT	3200		Maximum Limit of Bus Power (W) [0W ... 3000W]
CLI_Prot_Pars_ai[13]	INT	80		Maximum Coil Temperature (°C) [30°C ... 100°C]
CLI_Prot_Pars_ai[14]	INT	80		Maximum IGBT Temperature (°C) [30°C ... 100°C]
CLI_Prot_Pars_Get_ai	ARRAY[1..1...			DC/DC Conv. to Lithium B.S. - Got Protection Parameters

Figura 190. Parámetros de protección para el convertidor DC/DC asociado al stack de baterías de litio (CLI)

7.3.4 Parámetros de ajuste para el electrolizador (EZ)

Se dispone de un control por histéresis para que la presión en los stacks del electrolizador, durante la producción de hidrógeno, no descienda de 30 Bares ni supere los 35 Bares. Dicho control trabaja comparando la presión del buffer de salida del electrolizador con un valor umbral superior y un valor umbral inferior, y actúa abriendo o cerrando una electroválvula del circuito de hidrógeno situada a la salida del electrolizador. Cuando la presión en el buffer de salida del electrolizador supera el umbral superior, la electroválvula se abre y el hidrógeno producido es conducido hacia los tanques de hidruros. Cuando la presión en el buffer de salida del electrolizador desciende del umbral inferior, la electroválvula se cierra y el hidrógeno producido presuriza los stacks y el buffer de salida para recuperar presión.

En el proyecto de Unity Pro en el que se ha desarrollado el programa del *First Level Controller*, a través de la ventana Editor de Datos accesible mediante el explorador de proyectos, se tiene acceso a las variables *EZ_Buffer_Press_hth_r* y *EZ_Buffer_Press_lth_r* (Figura 191), en las cuales se almacenan los umbrales de presión para el control por histéresis de la presión en los stacks del electrolizador. Por defecto, dichos valores serán 33.5 Bares, para el umbral superior, y 31 Bares, para el umbral inferior.

La habilitación y deshabilitación del control por histéresis para la presión en los stacks del electrolizador se realiza mediante la variable *H2_Prod_HC_en_n* (Figura 192).

● EZ_Buffer_Press_hth_r	REAL		33.5	Electrolyzer Buffer Pressure High Threshold to Hysteresis Control (bar)
● EZ_Buffer_Press_lth_r	REAL		31.0	Electrolyzer Buffer Pressure Low Threshold to Hysteresis Control (bar)
● EZ_H2_F_Gas	BOOL			Electrolyzer Command signal for setting H2 Flow Constraint value

Figura 191. Valores umbrales para el control por histéresis de la presión de los stacks en el electrolizador.

● H2_Disch_HC_en_n	BOOL		1	Hysteresis Control for Hydride Tanks Discharge enabling (1 enabled / 0 disabled)
● H2_Prod_HC_en_n	BOOL		1	Hysteresis Control for H2 Production enabling (1 enabled / 0 disabled)
● H2C_FC_In_Press_r	REAL			Fuel Cell Input H2 Relative Pressure (Bar)

Figura 192. Variable para la habilitación y deshabilitación del control por histéresis de la presión de los stacks del electrolizador.

7.3.5 Parámetros de ajuste para la pila de hidrógeno (FC)

Se dispone de un control por histéresis para que la presión en el circuito de hidrógeno se mantenga entre 2 Bares y 5 Bares cuando se está alimentando a la pila de hidrógeno. A presiones por encima de 5 Bares pueden producirse daños tanto en la pila de hidrógeno como en el circuito que la alimenta; en este caso, dado que se dispone de elementos físicos en la instalación para limitar la presión del hidrógeno a ese valor, el control por histéresis sería una protección redundante. Por otro lado, la alimentación de la pila debe realizarse siempre a presiones por encima de los 2 Bares absolutos, según las indicaciones del fabricante.

El control por histéresis trabaja comparando la presión en el circuito de hidrógeno con un valor umbral superior y un valor umbral inferior, y actúa abriendo o cerrando una electroválvula del circuito de agua para permitir o cortar la inyección de agua caliente en los tanques de hidruros, a fin de incrementar o reducir la desorción del hidrógeno.

En el proyecto de Unity Pro en el que se ha desarrollado el programa del *First Level Controller*, a través de la ventana Editor de Datos accesible mediante el explorador de proyectos, se tiene acceso a las variables *H2C_Hydride_In_Press_hth_r* y *H2C_Hydride_In_Press_lth_r* (Figura 193), en las cuales se almacenan los umbrales de presión para el control por histéresis de la presión en el circuito de hidrógeno. Por defecto, dichos valores serán 4.2 Bares, para el umbral superior, y 3.5 Bares, para el umbral inferior.

La habilitación y deshabilitación del control por histéresis para la presión en el circuito de hidrógeno se realiza mediante la variable *H2_Disch_HC_en_n* (Figura 194).

● H2C_Hydride_In_Press_hth_r	REAL		4.2	Hydride Tanks Input H2 Relative Pressure Hight Threshold to Hysteresis Control (Barg)
● H2C_Hydride_In_Press_lth_r	REAL		3.5	Hydride Tanks Input H2 Relative Pressure Low Threshold to Hysteresis Control (Barg)
● H2C_Hydride_In_Press_r	REAL			Hydride Tanks Input H2 Relative Pressure (Barg)

Figura 193. Valores umbrales para el control por histéresis de la presión en el circuito de hidrógeno.

● F100_01	BOOL			F100 Cold Water Valve - Open/Closure signal
● H2_Disch_HC_en_n	BOOL		1	Hysteresis Control for Hydride Tanks Discharge enabling (1 enabled / 0 disabled)
● H2_Prod_HC_en_n	BOOL		1	Hysteresis Control for H2 Production enabling (1 enabled / 0 disabled)

Figura 194. Variable para la habilitación y deshabilitación del control por histéresis de la presión en el circuito de hidrógeno.

7.3.6 Parámetros de ajuste para la fuente de alimentación programable (PS)

Tanto el envío de consignas de tensión y de intensidad hacia la fuente de alimentación programable como las respectivas señales de realimentación se realiza mediante salidas y entradas analógicas de PLC respectivamente, y por ello requieren escalados para su acondicionamiento.

En el proyecto de Unity Pro en el que se ha desarrollado el programa del *First Level Controller*, a través de la ventana Editor de Datos accesible mediante el explorador de proyectos, se tiene acceso a las variables para el escalado de las señales de consigna y de realimentación de la fuente de alimentación programable (Figura 195). Dichas variables son las siguientes:

- **PS_I_Set_m_r.** Pendiente para el escalado de la consigna de intensidad. En una primera calibración, su valor se ajustó a 100 mV/A.
- **PS_I_Set_n_r.** Valor en el origen para el escalado de la consigna de intensidad. En una primera calibración, su valor se ajustó a 0 mV.
- **PS_V_Set_m_r.** Pendiente para el escalado de la consigna de tensión. En una primera calibración, su valor se ajustó a 165.656 mV/V.
- **PS_V_Set_n_r.** Valor en el origen para el escalado de la consigna de tensión. En una primera calibración, su valor se ajustó a 0 mV.
- **PS_Out_Bus_I_m_r.** Pendiente para el escalado de la medida de intensidad. En una primera calibración, su valor se ajustó a 0.010 A/mV.
- **PS_Out_Bus_I_n_r.** Valor en el origen para el escalado de la medida de intensidad. En una primera calibración, su valor se ajustó a 0.0533 A.
- **PS_Out_Bus_V_m_r.** Pendiente para el escalado de la medida de tensión. En una primera calibración, su valor se ajustó a 0.006 V/mV.
- **PS_Out_Bus_V_n_r.** Valor en el origen para el escalado de la medida de tensión. En una primera calibración, su valor se ajustó a 0 V.

PS_I_Set_m_r	REAL	100.0	Prog. Power Supply Output Bus Current - Slope of Scale Line
PS_I_Set_Max_r	REAL	100.0	Prog. Power Supply Maximum Output Bus Current Setpoint (A)
PS_I_Set_n_r	REAL	0.0	Prog. Power Supply Output Bus Current - Origin of Scale Line
PS_I_Set_r	REAL		Prog. Power Supply Output Bus Current Setpoint (A)
PS_I_Set_Rate_r	REAL	5.0	Prog. Power Supply Output Bus Current Setpoint Variation Rate (A/s)
PS_ManStart_Mess_si...	BOOL		Prog. Power Supply Manual Starting Message signal.
PS_Out_Bus_I_m_r	REAL	0.010	Prog. Power Supply Output Bus I - Slope of Scale Line
PS_Out_Bus_I_n_r	REAL	0.0533	Prog. Power Supply Output Bus I - Origin of Scale Line
PS_Out_Bus_V_m_r	REAL	0.006	Prog. Power Supply Output Bus V - Slope of Scale Line
PS_Out_Bus_V_n_r	REAL	0.0	Prog. Power Supply Output Bus V - Origin of Scale Line
PS_Out_Current_r	REAL		Prog. Power Supply Output Bus Current (A)
PS_Out_Power_r	REAL		Prog. Power Supply Output Bus Power (W)
PS_Out_Voltage_r	REAL		Prog. Power Supply Output Bus Voltage (V)
PS_Set_Reset_n	BOOL		Prog. Power Supply Setpoint Reset.
PS_Standby_Ack_n	BOOL		Prog. Power Supply Standby Acknowledgement Signal.
PS_System_Off_n	BOOL		Prog Power Supply State Off
PS_System_On_n	BOOL		Prog Power Supply State On
PS_V_Set_m_r	REAL	165.656	Prog. Power Supply Output Bus Voltage - Slope of Scale Line
PS_V_Set_Max_r	REAL	57.0	Prog. Power Supply Maximum Output Bus Voltage Setpoint (V)
PS_V_Set_n_r	REAL	-5.000	Prog. Power Supply Output Bus Voltage - Origin of Scale Line
PS_V_Set_r	REAL		Prog. Power Supply Output Bus Voltage Setpoint (V)

Figura 195. Variables para el escalado de las señales de consigna y de realimentación de la fuente de alimentación programable (PC).

7.3.7 Parámetros de ajuste para la carga DC programable (DCL)

Tanto el envío de la consigna de potencia como la lectura de la tensión y la intensidad de la carga DC programable se realiza mediante salidas y entradas analógicas de PLC, y por ello requieren escalados para su acondicionamiento.

En el proyecto de Unity Pro en el que se ha desarrollado el programa del *First Level Controller*, a través de la ventana Editor de Datos accesible mediante el explorador de proyectos, se tiene acceso a las variables para el escalado de las señales de consigna y de medida de tensión e intensidad de la carga DC programable (Figura 196). Dichas variables son las siguientes:

- **DCL_P_Set_m_r.** Pendiente para el escalado de la consigna de potencia. En una primera calibración, su valor se ajustó a 1.91 mV/W.
- **DCL_P_Set_n_r.** Valor en el origen para el escalado de la consigna de potencia. En una primera calibración, su valor se ajustó a -16.9 mV.
- **DCL_In_Bus_I_m_r.** Pendiente para el escalado de la medida de intensidad. En una primera calibración, su valor se ajustó a 0.1 A/mV.
- **DCL_In_Bus_I_n_r.** Valor en el origen para el escalado de la medida de intensidad. En una primera calibración, su valor se ajustó a 0.0 A.
- **DCL_In_Bus_V_m_r.** Pendiente para el escalado de la medida de tensión. En una primera calibración, su valor se ajustó a 0.006 V/mV.
- **DCL_In_Bus_V_n_r.** Valor en el origen para el escalado de la medida de tensión. En una primera calibración, su valor se ajustó a -0.0232 V.

● DCL_In_Bus_I_m_r	REAL	0.1	DC Prog Load - Input Bus I - Slope of Scale Line
● DCL_In_Bus_I_n_r	REAL	0.0	DC Prog Load - Input Bus I - Origin of Scale Line
● DCL_In_Bus_V_m_r	REAL	0.006	DC Prog Load - Input Bus V - Slope of Scale Line
● DCL_In_Bus_V_n_r	REAL	-0.0232	DC Prog Load - Input Bus V - Origin of Scale Line
● DCL_In_Current_r	REAL		DC Prog Load - Input Bus Current (A)
● DCL_In_Power_r	REAL		DC Prog Load - Input Bus Power (W)
● DCL_In_Voltage_r	REAL		DC Prog Load - Input Bus Voltage (V)
● DCL_ManStart_Mess_s...	BOOL		DC Prog Load - Manual Starting Message signal.
● DCL_P_Set_m_r	REAL	1.91	DC Prog Load - Output Bus Power Setpoint - Slope of Scale Line.
● DCL_P_Set_Max_r	REAL	2500.0	DC Prog Load - Maximum Input Bus Power Setpoint (W)
● DCL_P_Set_n_r	REAL	-16.8	DC Prog Load - Output Bus Power Setpoint - Origin of Scale Line.
● DCL_P_Set_r	REAL		DC Prog Load - Input Bus Power Setpoint (W).
● DCL_P_Set_Rate_r	REAL	100.0	DC Prog Load - Input Bus Power Setpoint Variation Rate (W/s).
● DCL_Set_Reset_n	BOOL		DC Prog Load - Setpoint Reset.
● DCL_Standby_Ack_n	BOOL		DC Prog Load - Standby Acknowledgement.

Figura 196. Variables para el escalado de la consigna de potencia y las medidas de tensión e intensidad de la carga DC programable (CLD).

7.3.8 Parámetros de ajuste para los circuitos de hidrógeno y agua

La medida de todas las variables de los circuitos de hidrógeno y de agua de la Microrred se realiza mediante entradas analógicas de PLC, y por ello requieren ser escaladas para su acondicionamiento.

En el proyecto de Unity Pro en el que se ha desarrollado el programa del *First Level Controller*, a través de la ventana Editor de Datos accesible mediante el explorador de proyectos, se tiene acceso a las variables para el escalado de las medidas de las magnitudes de los circuitos de hidrógeno y de agua (). Dichas variables son las siguientes:

- **EA2_C0_m.** Pendiente para el escalado de la medida de la temperatura del hidrógeno a la entrada de los tanques de hidruros. En una primera calibración, su valor se ajustó a 0.04 °C/mV.
- **EA2_C0_n.** Valor en el origen para el escalado de la medida de la temperatura del hidrógeno a la entrada de los tanques de hidruros. En una primera calibración, su valor se ajustó a 0.0 °C.
- **EA2_C1_m.** Pendiente para el escalado de la medida de la temperatura del agua a la entrada de los tanques de hidruros. En una primera calibración, su valor se ajustó a 0.04 °C/mV.
- **EA2_C1_n.** Valor en el origen para el escalado de la medida de la temperatura del agua a la entrada de los tanques de hidruros. En una primera calibración, su valor se ajustó a 0.0 °C.

- **EA2_C2_m.** Pendiente para el escalado de la medida de la temperatura del agua a la salida de los tanques de hidruros. En una primera calibración, su valor se ajustó a 0.04 °C/mV.
- **EA2_C2_n.** Valor en el origen para el escalado de la medida de la temperatura del agua a la salida de los tanques de hidruros. En una primera calibración, su valor se ajustó a 0.0 °C.
- **EA2_C3_m.** Pendiente para el escalado de la medida del caudal de agua inyectada en los tanques de hidruros. En una primera calibración, su valor se ajustó a 0.0028 L/s/mV.
- **EA2_C3_n.** Valor en el origen para el escalado de la medida del caudal de agua inyectada en los tanques de hidruros. En una primera calibración, su valor se ajustó a 2.0 L.
- **EA4_C0_m.** Pendiente para el escalado de la medida de la presión del hidrógeno a la entrada de los tanques de hidruros. En una primera calibración, su valor se ajustó a 0.001 Barg/mV.
- **EA4_C0_n.** Valor en el origen para el escalado de la medida de la presión del hidrógeno a la entrada de los tanques de hidruros. En una primera calibración, su valor se ajustó a 0.0 Barg.
- **EA4_C1_m.** Pendiente para el escalado de la medida de la presión del hidrógeno a la entrada de la pila de hidrógeno. En una primera calibración, su valor se ajustó a 0.001 Barg/mV.
- **EA4_C1_n.** Valor en el origen para el escalado de la medida de la presión del hidrógeno a la entrada de la pila de hidrógeno. En una primera calibración, su valor se ajustó a 0.0 Barg.
- **EA4_C2_m.** Pendiente para el escalado de la medida del caudal de hidrógeno hacia la pila de hidrógeno. En una primera calibración, su valor se ajustó a 0.02 NI/minuto/mV.
- **EA4_C2_n.** Valor en el origen para el escalado de la medida del caudal de hidrógeno hacia la pila de hidrógeno. En una primera calibración, su valor se ajustó a 0.0 NI/minuto.

EA2_C0	T_ANA_IN_...	%C...		Analog Input 2 Channel 0 - Hydride Tanks Input H2 Temperature Sensor
EA2_C0_m	REAL		0.04	Hydride Tanks Input H2 Temperature Sensor - Slope of Scale Line
EA2_C0_n	REAL		0.0	Hydride Tanks Input H2 Temperature Sensor
EA2_C1	T_ANA_IN_...	%C...		Analog Input 1 Channel 1 - Hydride Input Water Temperature Sensor
EA2_C1_m	REAL		0.04	Hydride Input Water Temperature Sensor - Slope of Scale Line
EA2_C1_n	REAL		0.0	Hydride Input Water Temperature Sensor - Origin of Scale Line
EA2_C2	T_ANA_IN_...	%C...		Analog Input 1 Channel 2 - Hydride Output Water Temperature Sensor
EA2_C2_m	REAL		0.04	Hydride Output Water Temperature Sensor - Slope of Scale Line
EA2_C2_n	REAL		0.0	Hydride Output Water Temperature Sensor - Origin of Scale Line
EA2_C3	T_ANA_IN_...	%C...		Analog Input 1 Channel 3 - Hydride Water Flow Sensor
EA2_C3_m	REAL		0.0028	Hydride Water Flow Sensor - Slope of Scale Line
EA2_C3_n	REAL		2.0	Hydride Water Flow Sensor - Origin of Scale Line
EA4_C0	T_ANA_IN_...	%C...		Analog Input 4 Channel 0 - Hydride Tanks Input H2 Pressure Sensor.
EA4_C0_m	REAL		0.001	Hydride Tanks Input H2 Pressure Sensor - Slope of Scale Line.
EA4_C0_n	REAL		0.0	Hydride Tanks Input H2 Pressure Sensor - Origin of Scale Line.
EA4_C1	T_ANA_IN_...	%C...		Analog Input 4 Channel 1 - Fuel Cell Input H2 Pressure Sensor
EA4_C1_m	REAL		0.001	Fuel Cell Input H2 Pressure Sensor - Slope of Scale Line.
EA4_C1_n	REAL		0.0	Fuel Cell Input H2 Pressure Sensor - Origin of Scale Line.
EA4_C2	T_ANA_IN_...	%C...		Analog Input 2 Channel 2 - Hydrogen Flow Sensor
EA4_C2_m	REAL		0.02	Hydrogen Flow Sensor - Slope of Scale Line.
EA4_C2_n	REAL		0.0	Hydrogen Flow Sensor - Origin of Scale Line.

Figura 197. Variables para el escalado de las magnitudes medidas de los circuitos de hidrógeno y agua.

7.4 ANEXO 4: Ensayos realizados para la caracterización del electrolizador EL500

7.4.1 Resultados del ensayo realizado el 19 de Julio de 2018 a las 10:22 horas.

Tabla 111. Resultados del ensayo realizado el 19 de Julio de 2018 a las 10:22 horas.

Consigna (0-100)	Potencia Stacks (W)	Caudal de H2 (NI/h)	Presión Stacks (bar)	Presión Buffer Salida (bar)
45	910	222	31,47	31,34
50	1025	268	32,04	31,94
55	1139	295	32,60	32,50
60	1254	323	32,86	32,76
65	1370	350	33,12	33,03
70	1485	377	33,27	33,18
75	1602	405	33,36	33,27
80	1719	432	33,54	33,46
85	1838	459	33,58	33,51
90	1957	486	33,70	33,56
95	2077	514	33,70	33,58
100	2077	514	33,69	33,56

7.4.2 Resultados del ensayo realizado el 19 de Julio de 2018 a las 11:30 horas.

Tabla 112. Resultados del ensayo realizado el 19 de Julio de 2018 a las 11:30 horas.

Consigna (0-100)	Potencia Stacks (W)	Caudal de H2 (NI/h)	Presión Stacks (bar)	Presión Buffer Salida (bar)
100	2058	509	32,27	32,13
95	2055	510	32,25	32,14
90	1932	483	31,91	31,80
85	1812	455	31,38	31,26
80	1694	428	31,11	30,94
75	1576	401	30,68	30,52
70	1463	373	30,35	30,20
65	1349	346	30,07	29,82

7.4.3 Resultados del ensayo realizado el 19 de Julio de 2018 a las 12:05 horas.

Tabla 113. Resultados del ensayo realizado el 19 de Julio de 2018 a las 12:05 horas.

Consigna (0-100)	Potencia Stacks (W)	Caudal de H2 (NI/h)	Presión Stacks (bar)	Presión Buffer Salida (bar)
65	1349	346	30,07	29,82
70	1463	373	30,49	30,29
75	1582	401	31,60	31,49
80	1700	428	32,14	31,99
85	1818	455	32,51	32,38
90	1939	482	32,73	32,57
95	2060	510	32,86	32,74
100	2056	509	32,80	32,67
90	1934	483	32,52	32,38
80	1697	428	31,61	31,47
70	1469	373	30,83	30,67
60	1235	318	30,05	29,80

7.4.4 Resultados del ensayo realizado el 20 de Julio de 2018 a las 11:27 horas.

Tabla 114. Resultados del ensayo realizado el 20 de Julio de 2018 a las 12:31 horas.

Consigna (0-100)	Potencia Stacks (W)	Caudal de H2 (NI/h)	Presión Stacks (bar)	Presión Buffer Salida (bar)
100	2159	510	31,26	31,05
95	2143	509	30,84	30,58
90	2000	482	30,54	30,21
85	1863	454	30,3	29,61
80	1727	428	30,60	28,54
75	1596	400	30,94	28,86
70	1475	373	31,56	27,77
65	1356	347	31,79	27,46
60	1237	319	32,26	26,36
55	1123	292	32,76	25,68
50	1010	264	32,96	24,89
45	898	237	33,15	23,97
40	788	210	33,37	22,76
35	677	182	33,47	21,92
30	572	155	33,53	20,25

7.4.5 Resultados del ensayo realizado el 23 de Julio de 2018 a las 12:11 horas.

Tabla 115. Resultados del ensayo realizado el 23 de Julio de 2018 a las 12:11 horas.

Consigna (0-100)	Potencia Stacks (W)	Caudal de H2 (NI/h)	Presión Stacks (bar)	Presión Buffer Salida (bar)	Presión Entrada Hidruros (barg)
100	2118	510	33,22	33,11	1,52
95	2110	510	33,52	33,40	1,57
90	1973	483	33,06	32,93	1,58
85	1842	455	32,42	32,26	1,61
80	1719	428	32,04	31,88	1,61
75	1595	400	31,39	31,27	1,63
70	1476	373	30,91	30,72	1,64
65	1358	346	30,50	30,36	1,63
60	1240	319	30,10	29,88	1,63

7.4.6 Resultados del ensayo realizado el 12 de Noviembre de 2018 a las 12:30 horas.

Tabla 116. Resultados del ensayo realizado el 12 de Noviembre de 2018 a las 12:30 horas.

Consigna (0-100)	Potencia Stacks (W)	Caudal de H2 (NI/h)	Presión Stacks (bar)	Presión Buffer Salida (bar)	Presión Entrada Hidruros (barg)
100	2162	513,58	31,44	23,75	1,17
95	2143	515,46	31,82	25,00	1,19
90	2019	486,61	32,49	24,52	1,19
85	1889	460,99	33,30	24,84	1,21
80	1764	432,41	33,39	24,81	1,21
75	1643	405,44	33,61	23,83	1,22
70	1522	377,93	33,77	22,45	1,22
65	1402	350,70	33,85	21,39	1,22

7.4.7 Resultados del ensayo realizado el 13 de Noviembre de 2018 a las 12:13 horas.

Tabla 117. Resultados del ensayo realizado el 13 de Noviembre de 2018 a las 12:13 horas.

Consigna (0-100)	Potencia Stacks (W)	Caudal de H2 (NI/h)	Presión Stacks (bar)	Presión Buffer Salida (bar)	Presión Entrada Hidruros (barg)
100	2253	508,73	30,27	28,81	1,27
90	2084	483,91	34,02	33,87	1,26
80	1742	423,12	33,21	32,83	1,26
70	1547	373,62	32,11	31,95	1,26
60	1293	319,42	31,41	31,23	1,26
50	1051	264,67	30,44	30,28	1,26
100	2172	510,88	34,03	33,88	1,28
50	1065	267,64	30,00	29,66	1,28
70	1524	373,89	31,44	31,20	1,28
50	1039	264,14	31,94	31,73	1,28
100	2147	509,54	33,96	33,80	1,3
50	1039	265,48	30,21	29,37	1,3
100	2136	511,15	34,26	34,07	1,31
40	808	211,28	30,85	27,56	1,31
100	2130	509,00	33,99	33,81	1,32
30	583	156,00	31,39	25,54	1,32
100	2129	510,62	34,09	33,90	1,36
21	390	106,11	32,33	21,63	1,35
100	2164	509,81	32,43	30,12	1,35

7.4.8 Resultados del ensayo realizado el 19 de Noviembre de 2018 a las 14:09 horas.

Tabla 118. Resultados del ensayo realizado el 19 de Noviembre de 2018 a las 14:09 horas.

Consigna (0-100)	Potencia Stacks (W)	Caudal de H2 (NI/h)	Presión Stacks (bar)	Presión Buffer Salida (bar)	Presión Entrada Hidruros (barg)
100	2237	509,81	31,2	31,06	1,3
80	1825	429,44	30,75	30,52	1,31
100	2139	509,81	33,72	33,54	1,4
95	2137	510,62	33,58	33,46	1,41
90	2008	484,18	33,3	33,11	1,41
85	1882	457,22	32,76	32,52	1,42
80	1755	427,55	33,25	32,77	1,44
75	1631	400,86	33,11	32,53	1,44

7.4.9 Obtención de la curva *Caudal de H₂ - Potencia de Stacks*.

Tabla 119. Puntos de *Caudal H₂ - Potencia Stacks* obtenidos de los ensayos.

Caudal de H ₂ (NI/h)	Potencia Stacks (W)	Caudal de H ₂ (NI/h)	Potencia Stacks (W)	Caudal de H ₂ (NI/h)	Potencia Stacks (W)
222,00	910	318,00	1235	377,93	1522
268,00	1025	510,00	2159	350,7	1402
295,00	1139	509,00	2143	508,73	2253
323,00	1254	482,00	2000	483,91	2084
350,00	1370	454,00	1863	423,12	1742
377,00	1485	428,00	1727	373,62	1547
405,00	1602	400,00	1596	319,42	1293
432,00	1719	373,00	1475	264,67	1051
459,00	1838	347,00	1356	510,88	2172
486,00	1957	319,00	1237	267,64	1065
514,00	2077	292,00	1123	373,89	1524
514,00	2077	264,00	1010	264,14	1039
509,00	2058	237,00	898	509,54	2147
510,00	2055	210,00	788	265,48	1039
483,00	1932	182,00	677	511,15	2136
455,00	1812	155,00	572	211,28	808
428,00	1694	510,00	2118	509	2130
401,00	1576	510,00	2110	156	583
373,00	1463	483,00	1973	510,62	2129
346,00	1349	455,00	1842	106,11	390
346,00	1349	428,00	1719	509,81	2164
373,00	1463	400,00	1595	509,81	2237
401,00	1582	373,00	1476	429,44	1825
428,00	1700	346,00	1358	509,81	2139
455,00	1818	319,00	1240	510,62	2137
482,00	1939	513,58	2162	484,18	2008
510,00	2060	515,46	2143	457,22	1882
509,00	2056	486,61	2019	427,55	1755
483,00	1934	460,99	1889	400,86	1631
428,00	1697	432,41	1764		
373,00	1469	405,44	1643		

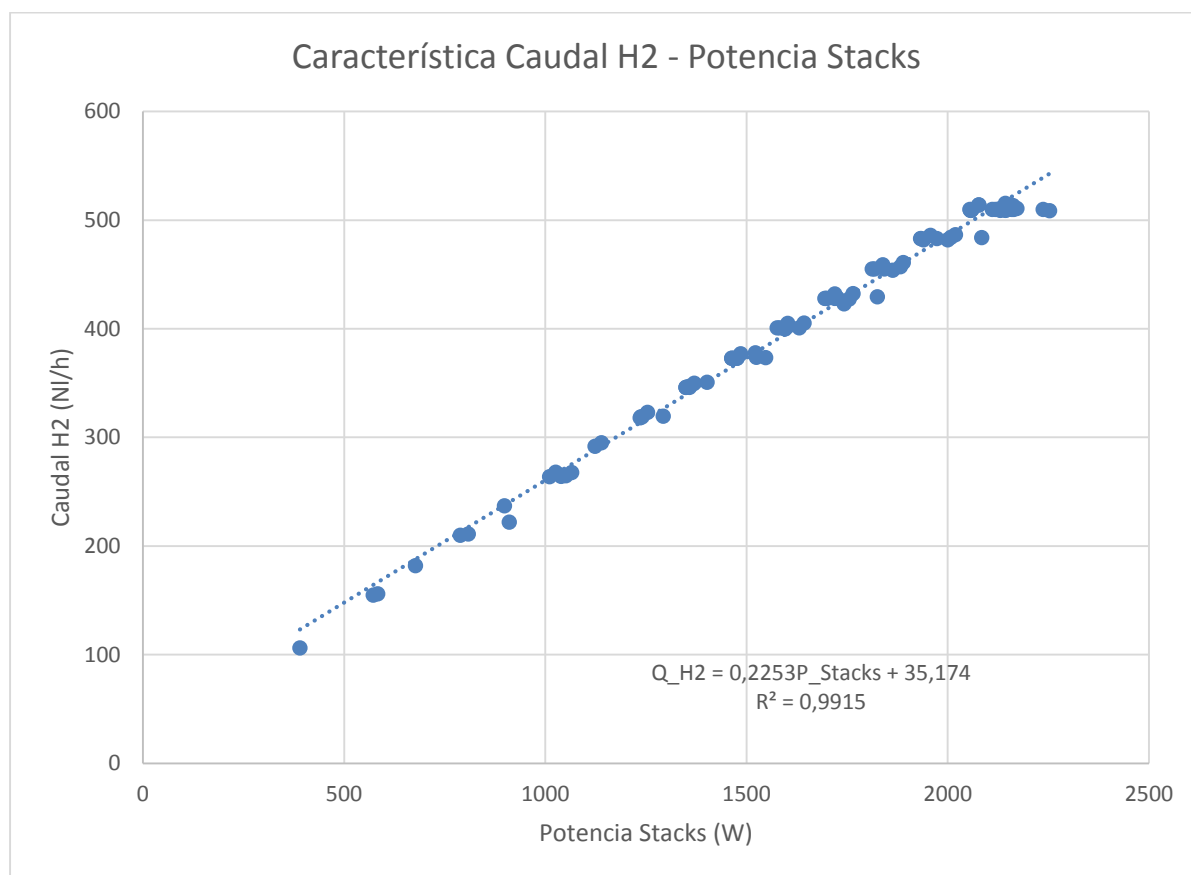


Figura 198. Curva característica *Caudal de H₂ - Potencia de Stacks*.

$$Q_{H_2} = 0.2253 \frac{Nl}{h \cdot W} \cdot P_{stacks} + 35.174 \frac{Nl}{h}$$

Figura 199. Ecuación de la curva característica *Caudal de H₂ - Potencia de Stacks*.

7.4.10 Obtención de la curva *Consigna Porcentual de Caudal - Potencia de Stacks*.

Tabla 120. Puntos de *Consigna Porcentual - Potencia Stacks* obtenidos de los ensayos.

Potencia Stacks (W)	Setpoint (%)	Potencia Stacks (W)	Setpoint (%)	Potencia Stacks (W)	Setpoint (%)
910	45	1235	60	1522	70
1025	50	2159	100	1402	65
1139	55	2143	95	2253	100
1254	60	2000	90	2084	90
1370	65	1863	85	1742	80
1485	70	1727	80	1547	70
1602	75	1596	75	1293	60
1719	80	1475	70	1051	50
1838	85	1356	65	2172	100
1957	90	1237	60	1065	50
2077	95	1123	55	1524	70
2077	100	1010	50	1039	50
2058	100	898	45	2147	100
2055	95	788	40	1039	50
1932	90	677	35	2136	100
1812	85	572	30	808	40
1694	80	2118	100	2130	100
1576	75	2110	95	583	30
1463	70	1973	90	2129	100
1349	65	1842	85	390	21
1349	65	1719	80	2164	100
1463	70	1595	75	2237	100
1582	75	1476	70	1825	80
1700	80	1358	65	2139	100
1818	85	1240	60	2137	95
1939	90	2162	100	2008	90
2060	95	2143	95	1882	85
2056	100	2019	90	1755	80
1934	90	1889	85	1631	75
1697	80	1764	80		
1469	70	1643	75		

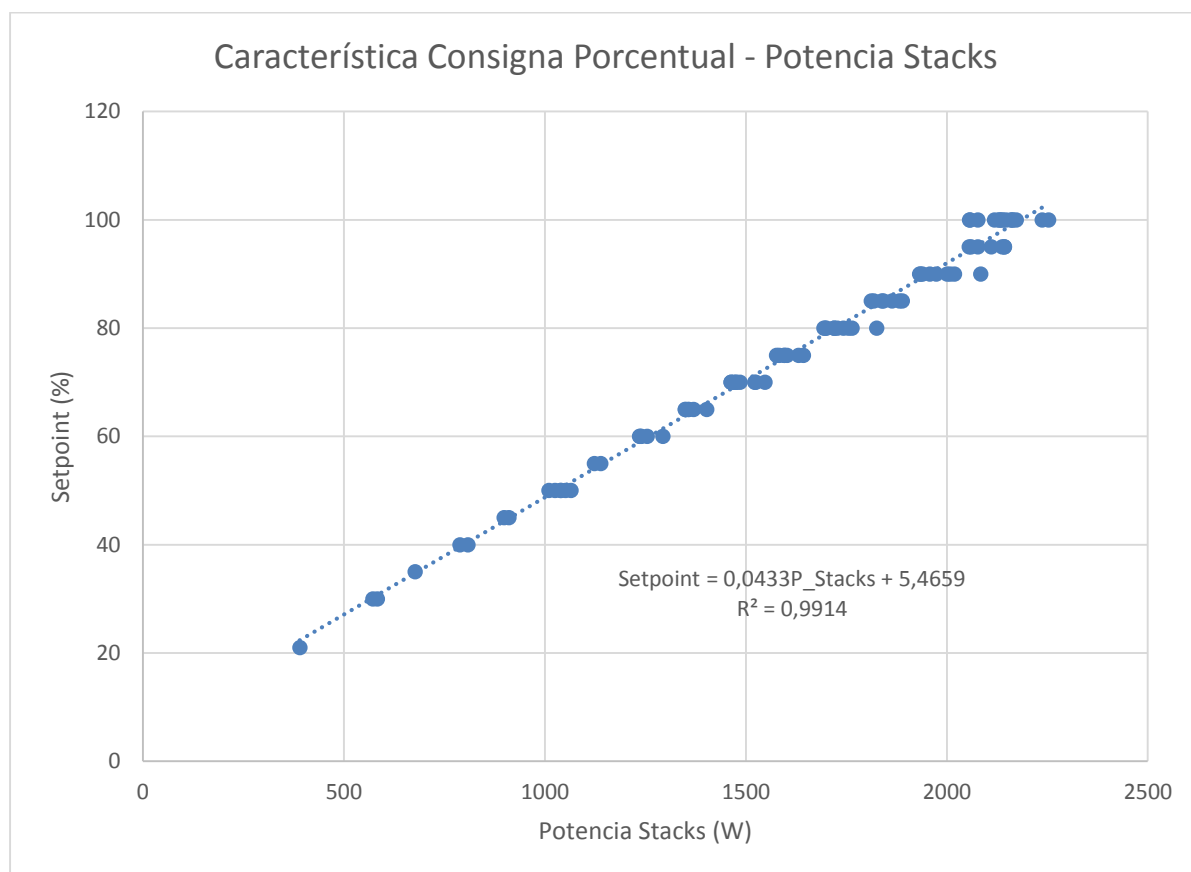


Figura 200. Curva característica *Consigna Porcentual - Potencia de Stacks*.

$$Setpoint = 0.0433 \frac{\%}{W} \cdot P_{stacks} + 5.4659\%$$

Figura 201. Ecuación de la curva característica *Consigna Porcentual - Potencia de Stacks*.

7.5 ANEXO V: Código del algoritmo de control heurístico basado en reglas

```
function [P_li_c,P_li_d, P_h2_d, H2_c_on_off, P_g_sell, P_g_pur, OM_li_d,
        OM_h2_d] = fcn(SOC_pb, SOC_li, P_h2_c, SOC_h2, Pres_h2, C_g_sell,
        C_g_pur, P_ph, D_user)

%Declaracion Variables

SOC_pb_max = 0.9;    %SOC_pb límite máximo.
SOC_pb_min = 0.4;    %SOC_pb límite mínimo.
SOC_pb_th = 0.1;     %SOC_pb umbral para carga/descarga.

P_li_c_max = 3.000; %P_li_c límite máximo.
P_li_c_min = 0.000; %P_li_c límite mínimo.
P_li_d_max = 3.000; %P_li_d límite máximo.
P_li_d_min = 0.000; %P_li_d límite mínimo.

SOC_li_max = 0.95;   %SOC_li límite máximo.
SOC_li_min = 0.40;   %SOC_li límite mínimo.

OM_li_d = 0;         %Coste de operación y mantenimiento del Stack de Litio

P_h2_d_max = 1.000; %P_h2_d límite máximo.
P_h2_d_min = 0.05;  %P_h2_d límite mínimo.

P_h2_c_max = 2.700; %P_h2_c límite máximo.

SOC_h2_max = 0.95;   %SOC_h2 límite máximo.
SOC_h2_min = 0.10;   %SOC_h2 límite mínimo.

Pres_h2_min = 2.5;   %Pres_h2 límite mínimo.

OM_h2_d = 0;         %Coste de operación y mantenimiento de la Pila de H2.

D_tot = 0;           %Demanda total.

%Código

P_li_c = 0;
P_li_d = 0;
P_h2_d = 0;
H2_c_on_off = 0;
P_g_sell = 0;
P_g_pur = 0;

%Obtención Demanda Total
if (SOC_pb > SOC_pb_max - SOC_pb_th)
    D_tot = D_user - 0.100;
end

if (SOC_pb < SOC_pb_min + SOC_pb_th)
    D_tot = D_user + 0.100;
end

if (SOC_pb <= SOC_pb_max - SOC_pb_th) && (SOC_pb >= SOC_pb_min + SOC_pb_th)
    D_tot = D_user;
end
```

```

%Caso 1: P_ph >= D. Almacenar / Vender.

%Caso 1.1: Stack baterías litio no disponible. Electrolizador no
%disponible.

if (P_ph >= D_tot) && (SOC_li >= SOC_li_max) && (SOC_h2 >= SOC_h2_max)
    %Anular descarga / compra
    P_li_d = 0;
    P_H2_d = 0;
    P_g_pur = 0;

    %El exceso de potencia fotovoltaica se vende en su totalidad.
    P_li_c = 0;
    H2_c_on_off = 0;
    P_g_sell = P_ph - D_tot;

end

%Caso 1.2: Stack baterías litio disponible. Electrolizador no disponible.
if (P_ph >= D_tot) && (SOC_li < SOC_li_max) && (SOC_h2 >= SOC_h2_max)

    %Anular descarga / compra
    P_li_d = 0;
    P_H2_d = 0;
    P_g_pur = 0;

    %Caso 1.2.a. El exceso de potencia fotovoltaica es menor a P_li_c_min.
    %Entonces se vende.
    if (P_ph - D_tot <= P_li_c_min)
        P_li_c = 0;
        H2_c_on_off = 0;
        P_g_sell = P_ph - D_tot;
    end

    %Caso 1.2.b. El exceso de potencia fotovoltaica se encuentra entre
    %P_li_c_min y P_li_c_max.
    %Entonces P_li_c se iguala al exceso de potencia fotovoltaica.
    if (P_ph - D_tot > P_li_c_min) && (D_tot - P_ph < P_li_c_max)
        P_li_c = P_ph - D_tot;
        H2_c_on_off = 0;
        P_g_sell = 0;
    end

    %Caso 1.2.c. El exceso de potencia fotovoltaica se encuentra por
    %encima de P_li_c_max.
    %Entonces P_li_c se iguala a P_li_c_max,
    %y el resto del exceso de potencia se vende.
    if (P_ph - D_tot >= P_li_c_max)
        P_li_c = P_li_c_max;
        H2_c_on_off = 0;
        P_g_sell = P_ph - D_tot - P_li_c_max;
    end
end

%Caso 1.3: Stack baterías litio no disponible. Electrolizador disponible.
if (P_ph >= D_tot) && (SOC_li >= SOC_li_max) && (SOC_h2 < SOC_h2_max)
    %Anular descarga / compra

```

```

P_li_d = 0;
P_H2_d = 0;
P_g_pur = 0;

%Caso 1.3.a. El exceso de potencia fotovoltaica es menor a P_h2_c_max.
%Entonces se vende.
if (P_ph - D_tot <= P_h2_c_max)
    P_li_c = 0;
    H2_c_on_off = 0;
    P_g_sell = P_ph - D_tot;
end

%Caso 1.3.b. El exceso de potencia fotovoltaica es mayor a P_h2_c_max.
%Entonces se activa el electrolizador,
%y el exceso de potencia resultante se vende.
if (P_ph - D_tot > P_h2_c_max)
    P_li_c = 0;
    H2_c_on_off = 1;
    P_g_sell = P_ph - D_tot - P_h2_c;
end

end

%Caso 1.4: Stack baterías litio disponible. Electrolizador disponible.
if (P_ph >= D_tot) && (SOC_li < SOC_li_max) && (SOC_h2 < SOC_h2_max)
    %Anular descarga / compra
    P_li_d = 0;
    P_H2_d = 0;
    P_g_pur = 0;

    %Caso 1.4.a. El exceso de potencia fotovoltaica es menor a P_li_c_min.
    %Entonces se vende.
    if (P_ph - D_tot <= P_li_c_min)
        P_li_c = 0;
        H2_c_on_off = 0;
        P_g_sell = P_ph - D_tot;
    end

    %Caso 1.4.b. El exceso de potencia fotovoltaica se encuentra entre
    %P_li_c_min y P_li_c_max.
    %Entonces P_li_c se iguala al exceso de potencia fotovoltaica.
    if (P_ph - D_tot > P_li_c_min) && (D_tot - P_ph < P_li_c_max)
        P_li_c = P_ph - D_tot;
        H2_c_on_off = 0;
        P_g_sell = 0;
    end

    %Caso 1.4.c. El exceso de potencia fotovoltaica se encuentra entre
    %P_li_c_max y P_li_c_max + P_h2_c_max.
    %Entonces P_li_c se iguala a P_li_c_max,
    %y el resto se vende.
    if (P_ph - D_tot >= P_li_c_max) &&
        (P_ph - D_tot <= P_li_c_max + P_h2_c_max)
        P_li_c = P_li_c_max;
        H2_c_on_off = 0;
        P_g_sell = P_ph - D_tot - P_li_c_max;
    end

    %Caso 1.4.d. El exceso de potencia fotovoltaica se encuentra por
    %encima de P_li_c_max + P_h2_c_max.
    %Entonces P_li_c se iguala a P_li_c_max,

```

```

    %se activa el electrolizador,
    %y el exceso de potencia restante se vende.
    if (P_ph - D_tot > P_li_c_max + P_h2_c_max)
        P_li_c = P_li_c_max;
        H2_c_on_off = 1;
        P_g_sell = P_ph - D_tot - P_li_c_max - P_h2_c;
    end
end

%Caso 2: P_ph < D. Consumir / Comprar.
if (P_ph < D_tot) && (SOC_h2 > SOC_h2_min)
    %Apertura válvulas circuito calentamiento
end
if (P_ph < D_tot) && (SOC_h2 <= SOC_h2_min)
    %Cierre válvulas circuito calentamiento
end

%Caso 2.1: Stack baterías litio no disponible. Pila h2 no disponible.
if (P_ph < D_tot) && (SOC_li <= SOC_li_min) && ((SOC_h2 <= SOC_h2_min)
    || (Pres_h2 <= Pres_h2_min))
    %Anular carga / venta
    P_li_c = 0;
    H2_c_on_off = 0;
    P_g_sell = 0;

    %La potencia comprada se iguala a la demanda no cubierta por la
    %potencia fotovoltaica.
    P_li_d = 0;
    P_h2_d = 0;
    P_g_pur = D_tot - P_ph;

end

%Caso 2.2: Stack baterías litio disponible. Pila h2 no disponible.
if (P_ph < D_tot) && (SOC_li > SOC_li_min) && ((SOC_h2 <= SOC_h2_min)
    || (Pres_h2 <= Pres_h2_min))
    %Anular carga / venta
    P_li_c = 0;
    H2_c_on_off = 0;
    P_g_sell = 0;

    %Cálculo coste kWh stack baterías de litio
    OM_li_d = 1.4545*SOC_li*SOC_li - 3.2795*SOC_li + 1.8209;

    %Caso 2.2.a. El kWh del stack de baterías de litio es más barato que
    %el kWh de la red,
    %y la demanda no cubierta por la potencia fotovoltaica está por debajo
    %de P_li_d_min.
    %Entonces P_g_pur se iguala a la demanda no satisfecha.
    if (OM_li_d < C_g_pur) && (D_tot - P_ph <= P_li_d_min)
        P_li_d = 0;
        P_h2_d = 0;
        P_g_pur = D_tot - P_ph;
    end

    %Caso 2.2.b. El kWh del stack de baterías de litio es más barato que
    %el kWh de la red,
    %y la demanda no cubierta por la potencia fotovoltaica se encuentra
    %entre P_li_d_min y P_li_d_max.

```



```

%Entonces P_li_d se iguala a la demanda no satisfecha.
if (OM_li_d < C_g_pur) && (D_tot - P_ph > P_li_d_min) &&
    (D_tot - P_ph <= P_li_d_max)
    P_li_d = D_tot - P_ph;
    P_h2_d = 0;
    P_g_pur = 0;
end

%Caso 2.2.c. El kWh del stack de baterías de litio es más barato que
%el kWh de la red,
%y la demanda no cubierta por la potencia fotovoltaica está por encima
%de P_li_d_max.
%Entonces P_li_d se iguala a P_li_d_max,
%y P_g_pur al resto de la demanda no cubierta.
if (OM_li_d < C_g_pur) && (D_tot - P_ph > P_li_d_max)
    P_li_d = P_li_d_max;
    P_h2_d = 0;
    P_g_pur = D_tot - P_ph - P_li_d;
end

%Caso 2.2.d. El kWh de la red es más barato que el kWh del stack de
%baterías de litio.
%Entonces P_g_pur se iguala a la demanda no satisfecha.
if (C_g_pur <= OM_li_d)
    P_li_d = 0;
    P_h2_d = 0;
    P_g_pur = D_tot - P_ph;
end

end

%Caso 2.3: Stack baterías litio no disponible. Pila h2 disponible.
if (P_ph < D_tot) && (SOC_li <= SOC_li_min) && (SOC_h2 > SOC_h2_min)
    && (Pres_h2 > Pres_h2_min)
    %Anular carga / venta
    P_li_c = 0;
    H2_c_on_off = 0;
    P_g_sell = 0;

    %Cálculo coste kWh pila de hidrógeno
    if (D_tot - P_ph < P_h2_d_max)
        OM_h2_d = 0.12*(1 + (D_tot - P_ph)/P_h2_d_max);
    end
    if (D_tot - P_ph >= P_h2_d_max)
        OM_h2_d = 0.24;
    end

    %Caso 2.3.a. El kWh de la pila de hidrógeno es más barato que el kWh
    %de la red,
    %y la demanda no cubierta por la potencia fotovoltaica está por debajo
    %de P_h2_d_min.
    %Entonces P_g_pur se iguala a la demanda no satisfecha.
    if (OM_h2_d < C_g_pur) && (D_tot - P_ph <= P_h2_d_min)
        P_li_d = 0;
        P_h2_d = 0;
        P_g_pur = D_tot - P_ph;
    end

    %Caso 2.3.b. El kWh de la pila de hidrógeno es más barato que el kWh
    %de la red,
    %y la demanda no cubierta por la potencia fotovoltaica se encuentra

```

```

%entre P_h2_min y P_h2_max.
%Entonces P_h2_d se iguala a la demanda no satisfecha.
if (OM_h2_d < C_g_pur) && (D_tot - P_ph > P_h2_d_min) &&
    (D_tot - P_ph < P_h2_d_max)
    P_li_d = 0;
    P_h2_d = D_tot - P_ph;
    P_g_pur = 0;
end

%Caso 2.3.c. El kWh de la pila de hidrógeno es más barato que el kWh
%de la red,
%y la demanda no cubierta por la potencia fotovoltaica está por
%encima de P_h2_max.
%Entonces P_h2_d se iguala a P_h2_max,
%y P_g_pur al resto de la demanda no cubierta.
if (OM_h2_d < C_g_pur) && (D_tot - P_ph > P_h2_d_max)
    P_li_d = 0;
    P_h2_d = P_h2_d_max;
    P_g_pur = D_tot - P_ph - P_h2_d;
end

%Caso 2.3.d. El kWh de la red es más barato que el kWh de la pila
%de hidrógeno.
%Entonces P_g_pur se iguala a la demanda no satisfecha.
if (C_g_pur <= OM_h2_d)
    P_li_d = 0;
    P_h2_d = 0;
    P_g_pur = D_tot - P_ph;
end

end

%Caso 2.4: Stack baterías litio disponible. Pila h2 disponible.
if (P_ph < D_tot) && (SOC_li > SOC_li_min) && (SOC_h2 > SOC_h2_min)
    && (Pres_h2 > Pres_h2_min)
    %Anular carga / venta
    P_li_c = 0;
    H2_c_on_off = 0;
    P_g_sell = 0;

    %Cálculo costes kWh stack baterías de litio y kWh pila de hidrógeno.
    OM_li_d = 1.4545*SOC_li*SOC_li - 3.2795*SOC_li + 1.8209;

    if (D_tot - P_ph < P_h2_d_max)
        OM_h2_d = 0.12*(1 + (D_tot - P_ph)/P_h2_d_max);
    end
    if (D_tot - P_ph >= P_h2_d_max)
        OM_h2_d = 0.24;
    end

    %Caso 2.4.a. El kWh de la red es más barato que el kWh del stack
    %de baterías de litio
    %y más barato que el kWh de la pila de hidrógeno.
    %Entonces P_g_pur se iguala a la demanda no satisfecha.
    if (C_g_pur <= OM_li_d) && (C_g_pur <= OM_h2_d)
        P_li_d = 0;
        P_h2_d = 0;
        P_g_pur = D_tot - P_ph;
    end
end

```

```

%Caso 2.4.b. El kWh del stack de baterías de litio es más barato
%que el kWh de la red,
%y más barato que el kWh de la pila de hidrógeno,
%y la demanda no cubierta por la potencia fotovoltaica está
%por debajo de P_li_d_min.
%Entonces P_g_pur se iguala a la demanda no satisfecha.
if (OM_li_d < C_g_pur) && (OM_li_d <= OM_h2_d) &&
    (D_tot - P_ph <= P_li_d_min)
    P_li_d = 0;
    P_h2_d = 0;
    P_g_pur = D_tot - P_ph;
end

%Caso 2.4.c. El kWh del stack de baterías de litio es más barato que
%el kWh de la red,
%y más barato que el kWh de la pila de hidrógeno,
%y la demanda no cubierta por la potencia fotovoltaica se encuentra
%entre P_li_d_min y P_li_d_max.
%Entonces P_li_d se iguala a la demanda no satisfecha.
if (OM_li_d < C_g_pur) && (OM_li_d <= OM_h2_d) &&
    (D_tot - P_ph < P_li_d_max)
    P_li_d = D_tot - P_ph;
    P_h2_d = 0;
    P_g_pur = 0;
end

%Caso 2.4.d. El kWh del stack de baterías de litio es más barato que
%el kWh de la red,
%y más barato que el kWh de la pila de hidrógeno,
%y la demanda no cubierta por la potencia fotovoltaica está por encima
%de P_li_d_max,
%y el kWh de la red es más barato que el kWh de la pila de hidrógeno.
%Entonces P_li_d se iguala a P_li_d_max,
%y P_g_pur al resto de la demanda no satisfecha.
if (OM_li_d < C_g_pur) && (OM_li_d <= OM_h2_d) &&
    (D_tot - P_ph >= P_li_d_max) && (C_g_pur <= OM_h2_d)
    P_li_d = P_li_d_max;
    P_h2_d = 0;
    P_g_pur = D_tot - P_li_d_max - P_ph;
end

%Caso 2.4.e. El kWh del stack de baterías de litio es más barato que
%el kWh de la red,
%y más barato que el kWh de la pila de hidrógeno,
%y la demanda no cubierta por la potencia fotovoltaica está por encima
%de P_li_d_max,
%y el kWh de la pila de hidrógeno es más barato que el kWh de la red,
%pero la demanda restante está por debajo de P_h2_d_min.
%Entonces P_li_d se iguala a P_li_d_max,
%y P_g_pur al resto de la demanda no satisfecha.
if (OM_li_d < C_g_pur) && (OM_li_d <= OM_h2_d) &&
    (D_tot - P_ph >= P_li_d_max) && (OM_h2_d < C_g_pur) &&
    (D_tot - P_ph - P_li_d_max <= P_h2_d_min)
    P_li_d = P_li_d_max;
    P_h2_d = 0;
    P_g_pur = D_tot - P_li_d_max - P_ph;
end

%Caso 2.4.f. El kWh del stack de baterías de litio es más barato que
%el kWh de la red,
%y más barato que el kWh de la pila de hidrógeno,

```

```

%y la demanda no cubierta por la potencia fotovoltaica está por encima
%de P_li_d_max,
%y el kWh de la pila de hidrógeno es más barato que el kWh de la red,
%y la demanda restante se encuentra entre P_h2_d_min y P_h2_d_max.
%Entonces P_li_d se iguala a P_li_d_max,
%y P_h2_d al resto de la demanda no satisfecha.
if (OM_li_d < C_g_pur) && (OM_li_d <= OM_h2_d) &&
    (D_tot - P_ph >= P_li_d_max) && (OM_h2_d < C_g_pur) &&
    (D_tot - P_ph - P_li_d_max > P_h2_d_min) &&
    (D_tot - P_ph - P_li_d_max < P_h2_d_max)
    P_li_d = P_li_d_max;
    P_h2_d = D_tot - P_li_d_max - P_ph;
    P_g_pur = 0;
end

%Caso 2.4.g. El kWh del stack de baterías de litio es más barato
%que el kWh de la red,
%y más barato que el kWh de la pila de hidrógeno,
%y la demanda no cubierta por la potencia fotovoltaica está por
%encima de P_li_d_max,
%y el kWh de la pila de hidrógeno es más barato que el kWh de la red,
%y la demanda restante se encuentra por encima de P_h2_d_max.
%Entonces P_li_d se iguala a P_li_d_max,
%P_h2_d se iguala a P_h2_d_max,
%P_g_pur se iguala al resto.
if (OM_li_d < C_g_pur) && (OM_li_d <= OM_h2_d) &&
    (D_tot - P_ph >= P_li_d_max) && (OM_h2_d < C_g_pur) &&
    (D_tot - P_ph - P_li_d_max <= P_h2_d_max)
    P_li_d = P_li_d_max;
    P_h2_d = P_h2_d_max;
    P_g_pur = D_tot - P_li_d_max - P_h2_d_max - P_ph;
end

%Caso 2.4.h. El kWh de la pila de hidrógeno es más barato que el kWh
%del stack de baterías de litio
%y más barato que el kWh de la red,
%y la demanda no cubierta por la potencia fotovoltaica está por debajo
%de P_h2_d_min,
%y el kWh de la red es más barato que el kWh stack de baterías de
%litio.
%Entonces P_g_pur se iguala a la demanda no satisfecha.
if (OM_h2_d < OM_li_d) && (OM_h2_d < C_g_pur) &&
    (D_tot - P_ph <= P_h2_d_min) && (OM_li_d < C_g_pur)
    P_li_d = 0;
    P_h2_d = 0;
    P_g_pur = D_tot - P_ph;
end

%Caso 2.4.i. El kWh de la pila de hidrógeno es más barato que el kWh
%del stack de baterías de litio
%y más barato que el kWh de la red,
%y la demanda no cubierta por la potencia fotovoltaica está por
%debajo de P_h2_min,
%y el kWh del stack de baterías de litio es más barato que el
%kWh de la red,
%pero la demanda no satisfecha está por debajo de P_li_d_min.
%Entonces P_g_pur se iguala a la demanda no satisfecha.
if (OM_h2_d < OM_li_d) && (OM_h2_d < C_g_pur) &&
    (D_tot - P_ph <= P_h2_d_min) && (OM_li_d < C_g_pur) &&
    (D_tot - P_ph <= P_li_d_min)
    P_li_d = 0;

```

```

    P_h2_d = 0;
    P_g_pur = D_tot - P_ph;
end

%Caso 2.4.j. El kWh de la pila de hidrógeno es más barato que el kWh
%del stack de baterías de litio
%y más barato que el kWh de la red,
%y la demanda no cubierta por la potencia fotovoltaica está por debajo
%de P_h2_min,
%y el kWh del stack de baterías de litio es más barato que el kWh de
%la red,
%y la demanda no satisfecha está por encima de P_li_d_min.
%Entonces P_li_d se iguala a la demanda no satisfecha.
if (OM_h2_d < OM_li_d) && (OM_h2_d < C_g_pur) &&
    (D_tot - P_ph <= P_h2_d_min) && (OM_li_d < C_g_pur) &&
    (D_tot - P_ph > P_li_d_min)
    P_li_d = D_tot - P_ph;
    P_h2_d = 0;
    P_g_pur = 0;
end

%Caso 2.4.k. El kWh de la pila de hidrógeno es más barato que el kWh
%del stack de baterías de litio
%y más barato que el kWh de la red,
%y la demanda no cubierta por la potencia fotovoltaica se encuentra
%entre P_h2_d_min y P_h2_d_max.
%Entonces P_h2_d se iguala a la demanda no satisfecha.
if (OM_h2_d < OM_li_d) && (OM_h2_d < C_g_pur) &&
    (D_tot - P_ph > P_h2_d_min) && (D_tot - P_ph < P_h2_d_max)
    P_li_d = 0;
    P_h2_d = D_tot - P_ph;
    P_g_pur = 0;
end

%Caso 2.4.l. El kWh de la pila de hidrógeno es más barato que el kWh
%del stack de baterías de litio
%y más barato que el kWh de la red,
%y la demanda no cubierta por la potencia fotovoltaica se encuentra
%por encima de P_h2_d_max,
%y el kWh de la red es más barato que el kWh del stack de baterías
%de litio.
%Entonces P_g_pur se iguala a la demanda no satisfecha.
if (OM_h2_d < OM_li_d) && (OM_h2_d < C_g_pur) &&
    (D_tot - P_ph > P_h2_d_max) && (C_g_pur <= OM_li_d)
    P_li_d = 0;
    P_h2_d = P_h2_d_max;
    P_g_pur = D_tot - P_ph - P_h2_d;
end

%Caso 2.4.m. El kWh de la pila de hidrógeno es más barato que el kWh
%del stack de baterías de litio
%y más barato que el kWh de la red,
%y la demanda no cubierta por la potencia fotovoltaica se encuentra
%por encima de P_h2_d_max,
%y el kWh del stack de baterías de litio es más barato que el kWh de
%la red,
%y la demanda no cubierta por la potencia fotovoltaica y la pila de
%hidrógeno es inferior a P_li_d_min.
%Entonces P_h2_d se iguala a P_h2_d_max
%y P_g_pur se iguala a la demanda no satisfecha.
if (OM_h2_d < OM_li_d) && (OM_h2_d < C_g_pur) &&

```

```

(D_tot - P_ph > P_h2_d_max) && (OM_li_d < C_g_pur) &&
(D_tot - P_ph - P_h2_d_max < P_li_d_min)
P_li_d = 0;
P_h2_d = P_h2_d_max;
P_g_pur = D_tot - P_ph - P_h2_d;
end

% Caso 2.4.n El kWh de la pila de hidrógeno es más barato que el kWh
% del stack de baterías de litio
% y más barato que el kWh de la red,
% y la demanda no cubierta por la potencia fotovoltaica se encuentra
% por encima de P_h2_d_max,
% y el kWh del stack de baterías de litio es más barato que el
% kWh de la red,
% y la demanda no cubierta por la potencia fotovoltaica y la pila
% de hidrógeno se encuentra entre P_li_d_min y P_li_d_max.
% Entonces P_h2_d se iguala a P_h2_d_max
% y P_li_d a la demanda no satisfecha.
if (OM_h2_d < OM_li_d) && (OM_h2_d < C_g_pur) &&
    (D_tot - P_ph > P_h2_d_max) && (OM_li_d < C_g_pur) &&
    (D_tot - P_ph - P_h2_d_max > P_li_d_min) &&
    (D_tot - P_ph - P_h2_d_max <= P_li_d_max)
    P_h2_d = P_h2_d_max;
    P_li_d = D_tot - P_ph - P_h2_d;
    P_g_pur = 0;
end

% Caso 2.4.o. El kWh de la pila de hidrógeno es más barato que el kWh
% del stack de baterías de litio
% y más barato que el kWh de la red,
% y la demanda no cubierta por la potencia fotovoltaica se encuentra
% por encima de P_h2_d_max,
% y el kWh del stack de baterías de litio es más barato que el kWh
% de la red,
% y la demanda no cubierta por la potencia fotovoltaica y la pila
% de hidrógeno es superior a P_li_d_max.
% Entonces P_h2_d se iguala a P_h2_d_max,
% P_li_d se iguala a P_li_d_max,
% y P_g_pur se iguala al resto de demanda no satisfecha.
if (OM_h2_d < OM_li_d) && (OM_h2_d < C_g_pur) &&
    (D_tot - P_ph > P_h2_d_max) && (OM_li_d < C_g_pur) &&
    (D_tot - P_ph - P_h2_d_max < P_li_d_max)
    P_h2_d = P_h2_d_max;
    P_li_d = P_li_d_max;
    P_g_pur = D_tot - P_ph - P_h2_d - P_li_d;
end

end

```

REFERENCIAS

- [1] **VALVERDE ISORNA, Luis.** *"Gestión de energía en sistemas con fuentes renovables y almacenamiento de energía basado en hidrógeno mediante control predictivo"*. Doctoral Thesis. University of Seville. 2013.
- [2] **CORONEL DOMÍNGUEZ, Manuel Ángel.** *"Automatización de micro-red eléctrica con fuentes renovables y almacenamiento de hidrógeno"*. Final Degree Project. University of Seville. 2011.
- [3] **RONDÁN GALÁN, José María.** *"Automatización, operación y caracterización de un electrolizador AEM"*. Final Degree Project. University of Seville. 2016.
- [4] *"Modbus Application Protocol Specification V1.1b3"*. Modbus Organization. 2012.
- [5] *"Modbus Messaging on TCP/IP Implementation Guide V1.0b"*. Modbus Organization. 2006.
- [6] *"Acta Heliocentris ELS500 User's Manual V1.0."* Acta Heliocentris. 2015.
- [7] *GEP-AICIA ESS3 DC/DC Converter Technical Documentation*. GEP-AICIA. 2018.
- [8] *"Modicon M340 con Unity Pro. Conexión serie. Manual del usuario"*. Schneider Electric. 2008.
- [9] *Schneider Electric Technical Support. Frequently Asked Questions* (www.schneider-electric.com/en/faqs/home/).
- [10] *"CAN Specification V2.0"*. Robert Bosch GmbH. 1991.
- [11] *"C_CAN Users's Manual. Revision 1.2"*. Robert Bosch GmbH. 2000.
- [12] *"Bosch Controller Area Network (CAN) Version 2.0. Protocol Standard"*. NXP - Freescale Semiconductor. 1998.
- [14] *"CANopen"*. Wikipedia. (en.wikipedia.org/wiki/CANopen).
- [15] *"CANopen application layer and communication profile. V4.2.0"*. CAN in Automation. 2011.
- [16] *"CAN/CANopen Converter. Connection scheme V2.0"*. ADFweb.
- [17] *"CAN/CANopen Converter. User's manual. rev 1.1"*. ADFweb.
- [18] *"Nexa 1200 Instruction Manual V2.3"*. Acta Heliocentris. 2014.
- [19] *"Nexa 1200 Firmware Uploader Instruction Manual"*. Acta Heliocentris. 2014.
- [20] *"Nexa Integration System refer to Nexa 1200 and Nexa DC1200"*. Acta Heliocentris. 2013.
- [21] *"Energy Management System. Operation and Installation Manual"*. Elite Power Solutions.
- [22] *"BMS Canbus Broadcaster V3.1 Specification"*. Elite Power Solutions.
- [23] *"Variostring. Regulador de carga solar MPPT. Manual para usuario"*. Studer Innotec. 2018.
- [24] *"Control remoto y módulo de programación RCC-02 y RCC-03 para Xtender. Manual para usuario"*. Studer Innotec. 2018.
- [25] *"Xtender serial protocol appendix"*. Studer Innotec. 2018.
- [26] *"Xcom-CAN multi-protocol communication set for Xtender and Vario-systems. User manual"*. Studer Innotec. 2018.
- [27] *"Studer Public Protocol for Xcom-CAN"*. Studer Innotec. 2018.
- [28] *"Schneider Electric. Añadir EDS a Hardware Catalog de Unity"*. Schneider Electric España. (<https://www.youtube.com/watch?v=BySRnGOjpew>)
- [29] **RODRÍGUEZ PENIN, Aquilino.** *Sistemas SCADA. 2ª Edición*. Barcelona. MARCOMBO Ediciones Técnicas. 2007. ISBN 978-84-267-1450-3.

- [30] **RODRÍGUEZ PENIN, Aquilino.** *Sistemas SCADA. Guía práctica.* Barcelona. MARCOMBO Ediciones Técnicas. 2007. ISBN 978-84-267-1455-8.
- [31] **PONSA, Pere and GRANOLLERS, Antoni.** *"Diseño de pantalla". Master Thesis.* Universitat Politècnica de Catalunya. 2008.
- [32] *"Unity Pro. Installation Manual".* Schneider Electric. 2014.
- [33] *"Enersol GNB Baterías industriales / Network Power Classic Solar. Hoja de datos".* Enersol GNB.
- [34] *"Labtech Int LTD hydrogen storage containers on the base of LaNi₅ - type metal hydrides. Brochure".* Labtech Int. LTD.
- [35] *"Amrel PLA/PLW Series Operation Manual. Programmable DC Electronic Load. M470039-01 rev D".* Ametek Programmable Power Inc.
- [36] *"Operating Manual for LBX/LBZ Series Digital Programmable Power Supply".* Powerbox - Xantrex Technology Inc.
- [37] *GBS - Lithium ion battery for solar system 100 Ah. Product Details.* (<http://www.gbslithiumbattery.com/sale-10946300-lithium-ion-battery-for-solar-system-100ah-low-self-discharge-explosion-proof.html>)
- [38] *Módulo fotovoltaico A-245M / A-250M. Hoja de características.* Atersa. Grupo Elecnor.
- [39] Dallia Ali and Daniel D. Aklil-D'Halluin, *"Modeling a Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cell System as a Hybrid Power Supply for Standalone Applications"*, published in Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. 2011.
- [40] **PIEDRAFITA MORENO, Ramón.** *Ingeniería de la automatización industrial. 2ª edición ampliada y actualizada.* Madrid. RA-MA Editorial. 2004. ISBN: 84-7897-604-3.
- [41] **MOLINA CANTERO, Francisco Javier.** *Apuntes de la asignatura Automatización Industrial - Ingeniería Técnica Industrial esp. Electrónica Industrial.* Universidad de Sevilla. 2012.
- [42] **RODRÍGUEZ MONDÉJAR, José Antonio.** *Guía GEMMA.* Universidad Pontificia de Comillas - ICAI.
- [43] **PLCopen.** *Structuring Program Development with IEC 61131-3.* PLCopen for efficiency in automation.
- [44] **CARRASCO SOLÍS, Juan Manuel, GALVÁN DÍEZ, Eduardo and VÁZQUEZ PÉREZ, Sergio.** *Apuntes de la asignatura Sistemas Electrónicos para la Gestión de las Energías Renovables - Máster en Ingeniería Electrónica, Robótica y Automática.* Universidad de Sevilla. 2018.
- [45] *IEEE Proceedings Zooms In on Smart Buildings-Microgrid Integration.* (<https://microgridnews.com/ieee-proceedings-zooms-smart-building-microgrid-integration/>)
- [46] Bolun Xu, Alexandre Oudalov, Andreas Ulbig, Göran Anderson and Daniel S. Kirschen, *"Modeling of Lithium-Ion Battery Degradation for Cell Life Assessment"*, IEEE Transactions on Smart Grid, VOL. 9, NO. 2, MARCH 2018.
- [47] **ZAKRISON, Erik.** *The Effect of Start/Stop Strategy on PEM Fuel Cell Degradation Characteristics.* Master of Science Thesis in the Master Degree Program Applied Physics. Chalmers University of Technology. 2011.
- [48] Alessandra Parisio, Evangelos Rikos and Luigi Glielmo, *"A Model Predictive Control Approach to Microgrid Operation Optimization"*, IEEE Transactions on Control Systems Technology, VOL. 22, NO. 5, SEPTEMBER 2014.